



## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN  
SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

NUEVO MODELO DE PREDICCIÓN CNOSSOS-EU  
PARA EL TRÁFICO RODADO.  
AJUSTE CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Mikel Pascual Díez

Miguel Arana Burgui

Pamplona, 27/6/2013

## Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Objetivo.....	3
1.2. Escenario anterior .....	4
1.2.1. <b>DIRECTIVA 2002/49/CE</b> .....	4
1.2.2. <b>OTROS MODELOS</b> .....	5
1.2.3. <b>CNOSSOS</b> .....	7
2. EMISIÓN DE RUIDO PARA TRÁFICO RODADO .....	9
2.1. Descripción de la fuente sonora.....	9
2.1.1. <b>CLASIFICACIÓN VEHÍCULOS.</b> .....	9
2.1.2. <b>CLASIFICACIÓN DE ASFALTOS</b> .....	13
2.1.3. <b>NÚMERO Y POSICION DE LAS FUENTES SONORAS EQUIVALENTES</b> .....	13
2.2. Emisión de la potencia sonora .....	14
2.2.1. <b>CONSIDERACIONES GENERALES. TRÁFICO FLUIDO Y VEHÍCULO INDIVIDUAL.</b> 14	
2.3. Rolling Noise.....	16
2.3.1. <b>ECUACIÓN GENERAL</b> .....	17
2.3.2. <b>CORRECCIONES</b> .....	17
2.4. Propulsion noise.....	18
2.4.1. <b>ECUACIÓN GENERAL</b> .....	18
2.4.2. <b>CONTRIBUCIÓN DE LAS DISTINTAS CORRECCIONES</b> .....	19
3. PROPAGACIÓN .....	25
3.1. Puesta en marcha .....	26
3.1.1. <b>DEFINICIONES</b> .....	26
3.1.2. <b>CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS</b> .....	26
3.1.3. <b>MODELO DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO</b> .....	27
3.2. Análisis de propagación. ....	30
3.2.1. <b>RECEPTOR</b> .....	30
3.2.2. <b>RUTAS PRIMARIAS DE PROPAGACIÓN</b> .....	31
3.3. Cálculos sobre un camino elemental.....	33
3.3.1. <b>DIVERGENCIA GEOMÉTRICA</b> .....	34
3.3.2. <b>LA ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA</b> .....	34
3.3.3. <b>EFFECTO DEL SUELO</b> .....	34
3.3.5. <b>REFLEXIONES SOBRE LOS OBSTÁCULOS VERTICALES</b> .....	46
4. CALCULO TEORICO .....	50



4.1.	Cálculo teórico de los valores "Rolling noise" y "Propulsion noise" para un determinado vehículo .....	50
4.1.1.	<b>ROLLING NOISE:</b> .....	50
4.1.2.	<b>PROPULSION NOISE:</b> .....	50
4.2.	Potencia instantánea de la fuente, $L_{W,0}$ .....	51
4.3.	Potencia media por unidad de longitud, $L_{W',eq,line}$ .....	51
4.4.	Predicción del Nivel de Presión Sonora en el receptor, $L_{Aeq}$ .....	52
5.	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y CAMPAÑA DE MEDIDAS .....	53
1.1	Dispositivo experimental .....	53
5.1.1.	<b>TOMA DE MEDIDAS</b> .....	53
5.1.2.	<b>ANÁLISIS</b> .....	54
5.2.	Campaña de medidas .....	55
5.2.1.	<b>LUGARES DE MEDICIÓN</b> .....	55
5.2.2.	<b>PREPARACIÓN</b> .....	58
5.2.3.	<b>ANÁLISIS DE MEDIDAS</b> .....	59
5.2.4.	<b>CÁLCULO DEL VALOR TEÓRICO PREDICHO POR CNOSSOS.</b> .....	62
6.	RESULTADOS .....	70
6.1.	Potencia instantánea de la fuente según categoría y velocidad. ....	70
6.2.	Potencia instantánea de la fuente ( $L_{W,0}$ ) en tercios de octava según diferentes pavimentos .....	73
6.3.	Comparativa distintas velocidades de la misma categoría .....	74
6.4.	Nivel de ruido equivalente ( $L_{Aeq}$ ) de la fuente según categoría y velocidad. ....	74
7.	ANÁLISIS .....	76
7.1.	Potencia instantánea de la fuente $L_{W,0}$ según categoría y velocidad. ....	76
7.2.	Potencia instantánea de la fuente $L_{W,0}$ en tercios de octava según diferentes pavimentos .....	77
7.3.	Comparativa distintas velocidades de la misma categoría .....	77
7.4.	Nivel de ruido equivalente ( $L_{Aeq}$ ) de la fuente según categoría y velocidad. ....	78
8.	CONCLUSIONES.....	79
8.1.	Propuestas de mejora.....	80
9.	REFERENCIAS .....	81
10.	ANEXOS.....	82
1.1.	Anexos capítulo 2 .....	82
1.2.	Anexos capítulo 6. ....	86

## 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto de fin de carrera, enmarcado dentro del campo de la acústica medioambiental, trata sobre la sensibilización sobre la contaminación acústica producida por el tráfico rodado. A lo largo de este trabajo se ha podido cuantificar el impacto ambiental producido por los vehículos al circular por una vía, y se ha comparado con los niveles predichos por el estándar europeo CNOSSOS. CNOSSOS es el acrónimo de "Common NOise aSSessment MethOdS". CNOSSOS lleva en desarrollo desde 2009 y se basa en unificar los diferentes métodos existentes en la Unión Europea sobre predicción de ruido tanto por el tráfico rodado como por tráfico aéreo y ferroviario.

En la primera parte del proyecto se expondrán los modelos anteriores, y la evolución que ha sufrido el propio CNOSSOS en este tiempo.

En la parte principal del proyecto se detallará y explicará el modelo CNOSSOS y se pondrá a prueba, para comprobar si sus predicciones encajan con las medidas in situ.

### 1.1. Objetivo

El objetivo principal de este Proyecto ha sido comprobar si concuerdan la predicción de ruido para tráfico rodado predicho por CNOSSOS y las medidas tomadas en las vías.

Para ello se han llevado a cabo medidas de ruido ambiental con aforación de vehículos y se han comparado con un modelo que permite predecir los niveles sonoros en función de variables de tráfico. (CNOSSOS).

Las medidas se han realizado en dos municipios de la Comunidad Foral de Navarra. Cizur Mayor y Barañain.

Las medidas implicarán no solo niveles globales de banda ancha sino también en bandas de tercio de octava desde 25 Hz a 10 kHz, con la finalidad de analizar el ajuste del nuevo modelo CNOSSOS. El análisis se llevará a cabo para el modelo de fuente, no involucrando (salvo su incidencia más simple) al modelo de propagación.

## 1.2. Escenario anterior

La Unión Europea, en el marco de la lucha contra las molestias sonoras, establece un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir los efectos perjudiciales de la exposición al ruido ambiental. Dicho enfoque se basa en la determinación cartográfica de la exposición al ruido según métodos comunes y en la aplicación de planes de acción a nivel local.

La primera medida para conseguir paliar las molestias sonoras fue la puesta en marcha de la directiva 2002/49/CE.

### 1.2.1. DIRECTIVA 2002/49/CE.

La directiva tiene por objeto sentar unas bases que permitan elaborar medidas comunitarias relativas a las fuentes de ruido.

El principal objetivo de la directiva es combatir el ruido que percibe la población sobre todo en zonas urbanizadas, en parques públicos u otras zonas tranquilas en una aglomeración, en zonas tranquilas en campo abierto, en las proximidades de centros escolares y en los alrededores de hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido. No se aplica al ruido producido por la propia persona expuesta, por las actividades domésticas, por los vecinos, en el lugar de trabajo ni en el interior de medios de transporte, así como tampoco a los ruidos debidos a las actividades militares en zonas militares.

La directiva consta de las siguientes partes:

#### 1.2.1.1. Indicadores de ruido y métodos de evaluación

Se definen conceptos como el  $L_{den}$ , que es un indicador del nivel de ruido global durante el día, la tarde y la noche, utilizado para determinar la molestia vinculada a la exposición al ruido; se compone de:

$L_{day}$  es el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos diurnos de un año y al que le corresponden 12 horas diarias.

$L_{evening}$  es el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos vespertinos de un año y al que le corresponden 4 horas diarias.

$L_{night}$  es el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos nocturnos de un año y al que le corresponden 8 horas diarias.

Los indicadores de ruido  $L_{day}$ ,  $L_{evening}$  y  $L_{night}$  se relacionan con el ruido del tráfico rodado, aéreo y ferroviario y el ruido industrial.  $L_{night}$  también es un indicador del nivel sonoro durante la noche que determina las alteraciones del sueño

#### 1.2.1.2. Cartografiado estratégico del ruido

En la directiva se establece el marco y los tiempos para realizar mapas de ruido. Un mapa estratégico de ruido permite evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona sometida a distintas fuentes de ruido, así como realizar predicciones generales para dicha zona.

#### 1.2.1.3. Planes de acción

Los planes de acción tienen por objeto afrontar las cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido si fuera necesario. Deben cumplir las prescripciones mínimas establecidas por la directiva.

#### **1.2.1.4. Información de los ciudadanos**

Antes de que se aprueben los planes de acción, se debe realizar una consulta pública y se deben tener en cuenta sus resultados.

#### **1.2.2. OTROS MODELOS**

CNOSSOS que será el método descrito en este proyecto parte de la base de otros modelos, el Nord 2000 de los países escandinavos, el proyecto europeo Harmonoise, y el modelo francés NMPB-Routes-2008 que ha sido utilizado por los países sin modelo propio.

Los modelos de predicción, como Nord 2000 y Harmonoise, incluyen dos submodelos: el modelo que predice la emisión sonora del flujo de tráfico rodado y el modelo que predice la propagación (atenuación) de dicha emisión sonora hasta el receptor mientras que en otros modelos existe relación entre ambos, aunque el nombre del modelo de predicción propiamente dicho hace referencia solo a la propagación, como es el caso de NMPB-Routes-2008.

El método Nord 2000 se desarrolló en el período 1996-2000, revisado en 2006 y, reúne muchos aspectos parecidos con el modelo Harmonoise. El modelo se basa en la teoría geométrica de los rayos y la teoría de la difracción e incorpora los cálculos en bandas de tercios de octava. El efecto de la dispersión por objetos tales como las zonas de viviendas o los bosques puede ser incluido. En referencia al efecto del suelo, éste se caracteriza por su impedancia y rugosidad.

El método Harmonoise calcula la atenuación del sonido que se propaga desde un punto de origen, fuente, a un punto receptor, en un único plano de propagación; por este motivo el modelo se denomina "punto a punto".

El modelo tiene en cuenta la propagación a través de varios perfiles de terreno complejos y, en una amplia variedad de condiciones meteorológicas.

En el método Harmonoise, el modelo de propagación del ruido hasta el receptor es independiente del modelo de la fuente generadora de ruido.

Existen dos modelos de propagación distintos: un modelo de referencia, el cual consume relativamente bastante tiempo de cálculo y se encuentra pensado para el uso por especialistas y, un modelo, denominado de ingeniería destinado al uso diario para la predicción del ruido, el cual se ha evaluado y afinado a partir de los resultados numéricos del modelo de referencia.

El método nacional francés, NMPB-Routes-2008, está basado en el concepto de la trayectoria de propagación. Entre fuente y receptor pueden existir varias trayectorias dependiendo de la topografía y obstáculos.

El modelo francés tiene en cuenta las condiciones meteorológicas estándar, y los valores de emisión se expresan en tercios de octava. En su última revisión se han realizado modificaciones respecto a la fuente como la reducción de su altura y la introducción de dos

espectros distintos. A pesar de los modelos anteriores, el modelo francés tiene en cuenta las condiciones meteorológicas estándar, para ajustar la previsión a largo plazo. Son clasificadas en dos tipos: condiciones meteorológicas “favorables para la propagación” y “condiciones acústicas homogéneas”.

La modelización de la fuente sonora en el caso del tráfico rodado, se suele expresar en términos del  $L_{A,w}$ , potencia sonora de la fuente con ponderación frecuencial A y, se suele considerar como una función de varios parámetros: la frecuencia, la tipología de los vehículos, la velocidad de los mismos, su aceleración o desaceleración, el tipo de superficie de rodamiento, el tipo de neumático, los elementos singulares de la vía (como pueden ser puentes, túneles, viaductos o cruces), la segmentación de la fuente o el método mediante el cual la fuente lineal del tránsito se descompone en fuentes puntuales y la posición de la fuente.

A continuación se muestra una comparativa entre los métodos Harmonoise y NMPB, frente a las medidas reales. Las medidas se realizaron en una autovía con alrededor de 4000 vehículos por hora, de los cuales el 5% eran vehículos pesados.

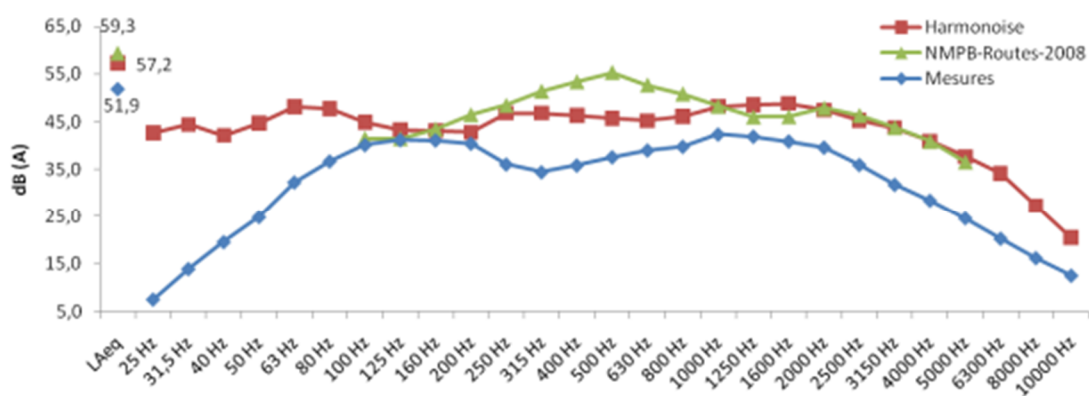


Fig. 1. 1

Como se observa ambos modelos ofrecen resultados muy dispares sobre todo a bajas frecuencias, la mayor correlación se da alrededor de los 125 Hz y de los 1250 Hz; en el resto de frecuencias la diferencia entre las medidas reales y los dos modelos nunca es menor de 5 dBA. A fin de mejorar la calidad y la fiabilidad de los resultados de la evaluación global del ruido, la Comisión Europea ha preparado un método común de evaluación del ruido, el que se estudiará en este proyecto, llamado CNOSSOS.

### 1.2.3. CNOSSOS

Cnossos-UE describe el marco metodológico común para la planificación estratégica mapas de ruido bajo la Directiva sobre el ruido ambiental (2002/49/CE). También se describe el proceso y los actores clave involucrados en el desarrollo de Cnossos y la UE. Incluye la fase de desarrollo del proceso de Cnossos y la UE (2010-2012). El objetivo final es tener la metodología común para realizar una evaluación operativa para la próxima ronda de mapas estratégicos de ruido en los países miembros de la Unión Europea, prevista para 2017.

#### 1.2.3.1. Diferencias CNOSSOS 2010 Y CNOSSOS 2012

La última versión de CNOSSOS incorpora modificaciones importantes respecto al modelo de 2010.

En este apartado describiremos las más importantes relacionados con la operativa del cálculo.

##### 1.2.3.1.1. Número de fuentes.

Para el cálculo del ruido de propagación y para determinar la potencia sonora emitida es necesario describir el vehículo con una o varias fuentes puntuales.

En la versión anterior los vehículos de categoría 1,2 y 3 eran descritos con dos fuentes puntuales, situadas a 1 y a 30 cm de altura sobre el suelo respectivamente.

En la versión 2012, se anula una de esas fuentes y el resultado es una sola fuente situada a 0,05 m del suelo.

En el caso de los vehículos a dos ruedas (categoría 4) la única fuente existente, pasa de estar situada a 30 cm, a estarlo 50 cm.

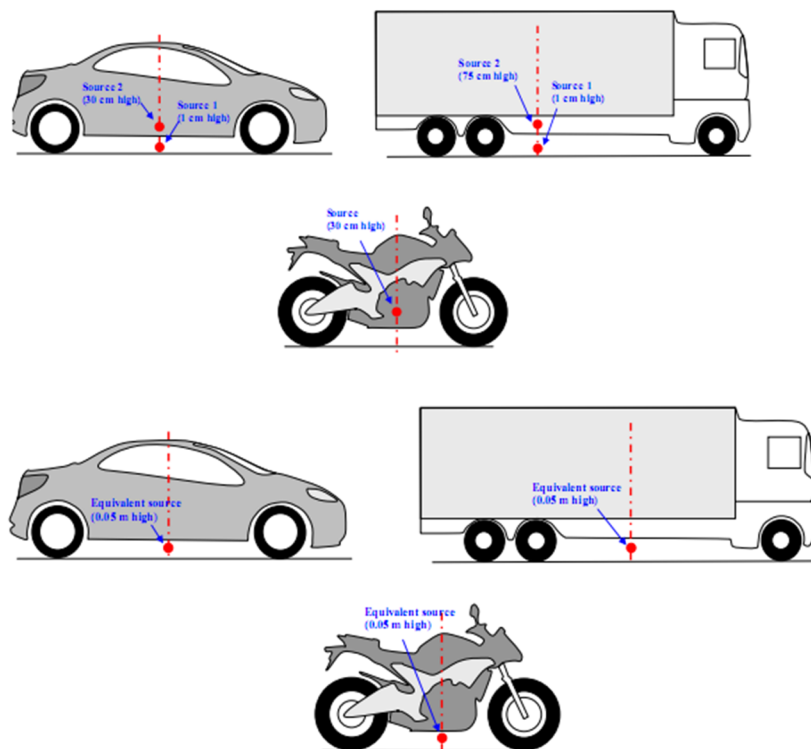


Fig. 1. 2

En la parte superior número y posición de fuentes en CNOSSOS 2010. En la inferior CNOSSOS 2012.

### 1.2.3.1.2. CÁLCULO $L_{W,0}$

Esto supone que al calcular la potencia instantánea de la fuente ( $L_{W,0}$ ), la fórmula cambie.

Dado que  $L_{W,0}$  el índice sobre el que se han realizado todas las comparaciones en las conclusiones del proyecto, parece importante indicar el cambio.

Al desaparecer una fuente tal como se describe en el apartado anterior, la fórmula cambia de la siguiente manera.

Versión CNOSSOS 2010:

$$L_{W,dir,low,j,m}(v) = 10 \times \lg \left( 0.8 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.2 \times 10^{L_{WP,i,m}/10} \right)$$

$$L_{W,dir,high,j,m}(v) = 10 \times \lg \left( 0.2 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.8 \times 10^{L_{WP,i,m}/10} \right)$$

Ecuación 1. 1

- $L_{WR,i,m}$  y  $L_{WP,i,m}$  son los valores de Rolling y Propulsion noise.

$$L_{W,0} = 10 \times \log \left( 0.5 \times 10^{L_{W,low,j,m}/10} + 0.5 \times 10^{L_{W,high,j,m}/10} \right)$$

Ecuación 1. 2

- $L_{W,low,i,m}$  y  $L_{W,high,i,m}$  son los valores de fuente inferior y superior.

Versión CNOSSOS 2012:

$$L_{W,0} = 10 \times \log(10^{L_{WR}/10} + 10^{L_{WP}/10})$$

Ecuación 1. 3

- $L_{WR}$  y  $L_{WP}$  son los valores de Rolling Noise y Propulsion Noise

Se observa que se elimina el paso de cálculo de fuente superior e inferior y se calcula directamente la potencia instantánea de la fuente con los índices de Rolling Noise y Propulsion Noise.

## 2. EMISIÓN DE RUIDO PARA TRÁFICO RODADO

### 2.1. Descripción de la fuente sonora.

#### 2.1.1. CLASIFICACIÓN VEHÍCULOS.

El ruido de tráfico rodado es resultante de la suma del ruido producido por cada uno de los vehículos individuales que forman el tráfico. Estos pueden agruparse en cuatro categorías dependiendo de sus características de emisión de ruido:

Categoría 1: Vehículos ligeros.

Categoría 2: Vehículos de peso medio.

Categoría 3: Vehículos pesados.

Categoría 4: Vehículos de dos ruedas.

En el caso de los vehículos de dos ruedas se definen por separado dos subgrupos distintos: ciclomotores y motocicletas de mayor cilindrada, ya que sus modos de conducción, son muy diferentes y sus potencias acústicas varían notablemente.

Los detalles de los tipos de vehículos para cada categoría se muestran en la siguiente tabla:

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos ligeros	Coches de pasajeros, furgonetas de reparto inferiores a 3500 kg incluyendo trailers y caravanas.
2	Vehículos de peso medio	Furgonetas de reparto superiores a 3500 kg, autobuses, caravanas, etc. con dos ejes y doble montaje de neumático en el eje trasero.
3	Vehículos pesados	Camiones, autobuses, caravanas, con tres ejes como mínimo.
4 a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads inferiores a 50cc.
4 b		Motocicletas, triciclos o quads superiores a 50cc.

Tabla 2. 1

A continuación se muestra una comparación, en banda ancha, para cada tipo de vehículo en función de la velocidad. En la primera, el ruido hace referencia a la emisión de rolling noise, mientras que la segunda lo hace para propulsion noise. Para el cálculo se ha tomado como ejemplo el tipo de asfalto TBC. No se muestran los niveles de la categoría 4 en la primera grafica porque el rolling noise emitido por una motocicleta es despreciable en comparación con el propulsion noise.



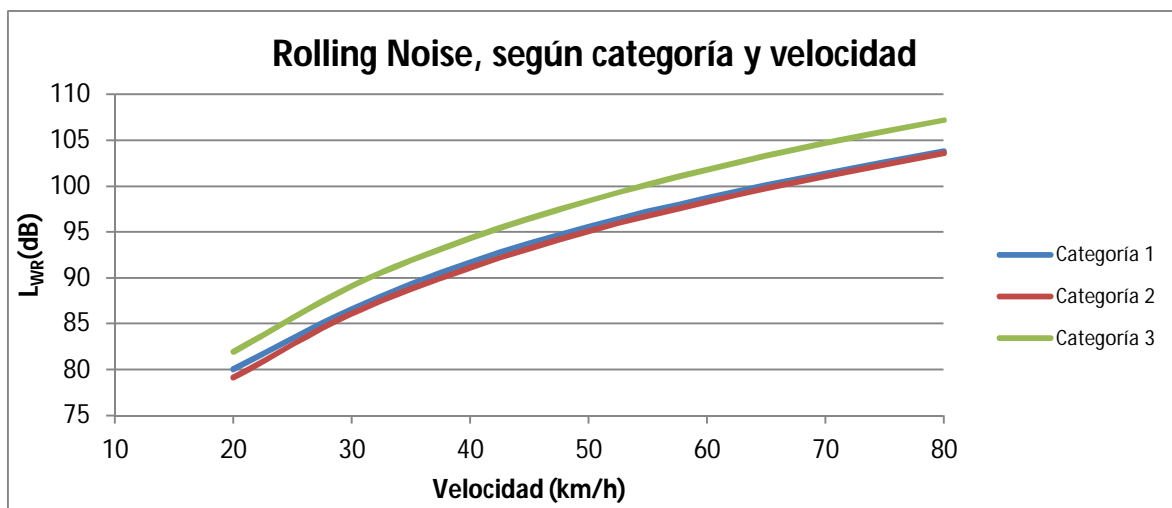


Fig. 2. 1

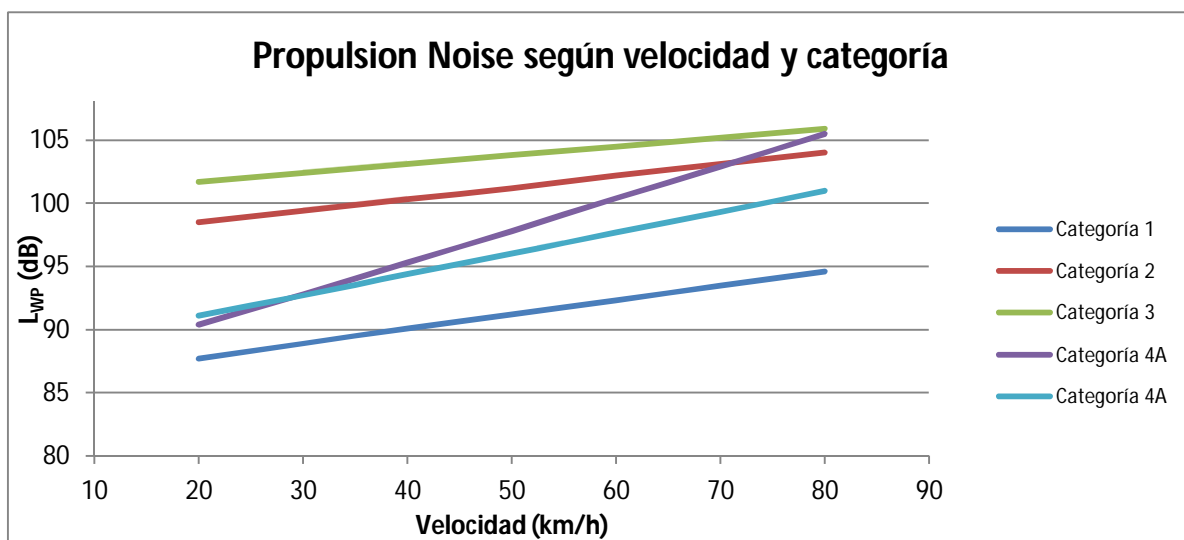


Fig. 2. 2

En la primera gráfica, se observa que los niveles aumentan de forma logarítmica, mientras que en la segunda lo hacen linealmente.

Para rolling noise, los niveles son muy parecidos para las 3 categorías, siendo casi iguales los niveles entre categorías 1 y 2.

La diferencia entre las categorías 2 y 3 es de alrededor de 4 dBA, en todas velocidades. Eso significa que si hay errores a la hora de clasificar un vehículo entre la categoría 2 y 3, se dará un error de 4 dBA.

En general, si se comete un error al clasificar el tipo de vehículo, el error que se puede cometer es de 3 ó 4 dBA para cada velocidad. Un error asumible.

En el caso de propulsion noise, los niveles difieren más entre categorías. Sin embargo la diferencia entre categorías 2 y 3 nunca supera los 3 dBA.

Sin embargo sí que existen grandes diferencias entre ciclomotores y motocicletas. En concreto, el error que se puede llegar a cometer si se desconoce el tipo de vehículo de dos ruedas es de entre 4 dBA para una velocidad de 20 km/h, y 10 dBA para 80 km/h.

En este caso, si se comete un error al clasificar el tipo de vehículo el error que se puede cometer es de hasta 10 o 15 dBA para cada velocidad.

Si atendemos a la velocidad, las diferencias aumentan; por ejemplo si un vehículo que circula a 20 km/h, se clasifica como de 80 km/h, la diferencia sería de 20 dBA en rolling noise. Es decir entre 3 y 5 dBA cada 10 km/h.

En propulsion noise entre vehículos de categorías 1, 2, 3 y 4b , el error por cada 10 km/h es de 1 a 2 dBA.

Para ciclomotores (cat. 4a) aumenta hasta 3 o 4 dBA.

En el caso de propulsion noise si se comete un error al clasificar la velocidad se producen dos casos diferenciados.

Por un lado para categorías 1, 2 y 3 y 4b se produce un error de entre 6 y 8 dBA, y por otro para la categoría 4a la diferencia aumenta hasta los 16 dBA.

Estos datos variarán según el asfalto, por eso no se pueden extrapolar a cualquier paso de un vehículo.

En las siguientes gráficas se muestra la diferencia entre rolling y propulsion noise para la categoría 1 y todos los tipos de asfalto, en función de la velocidad.

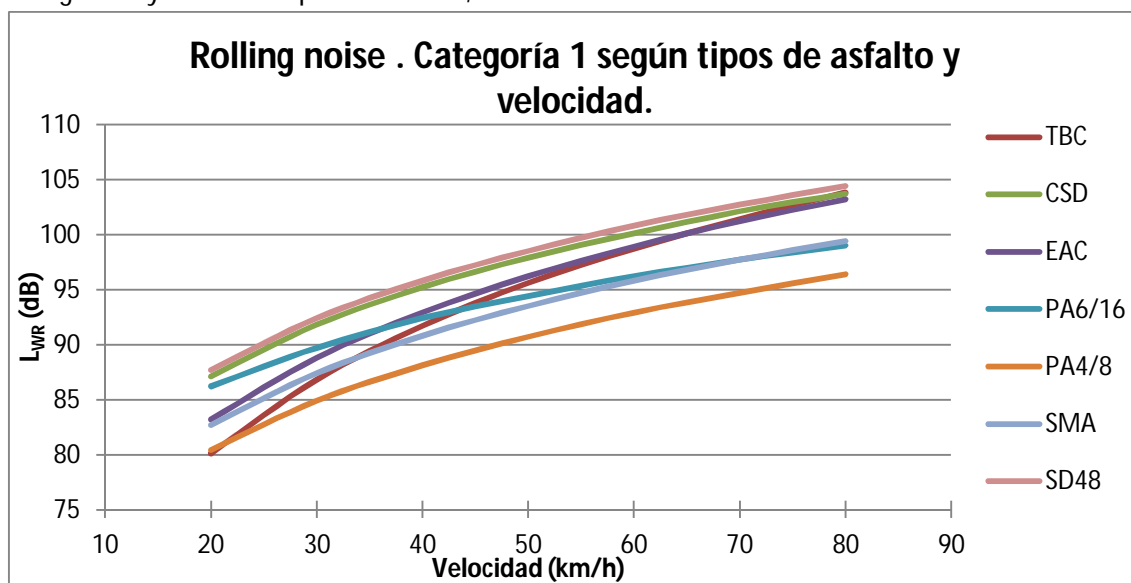


Fig. 2. 3

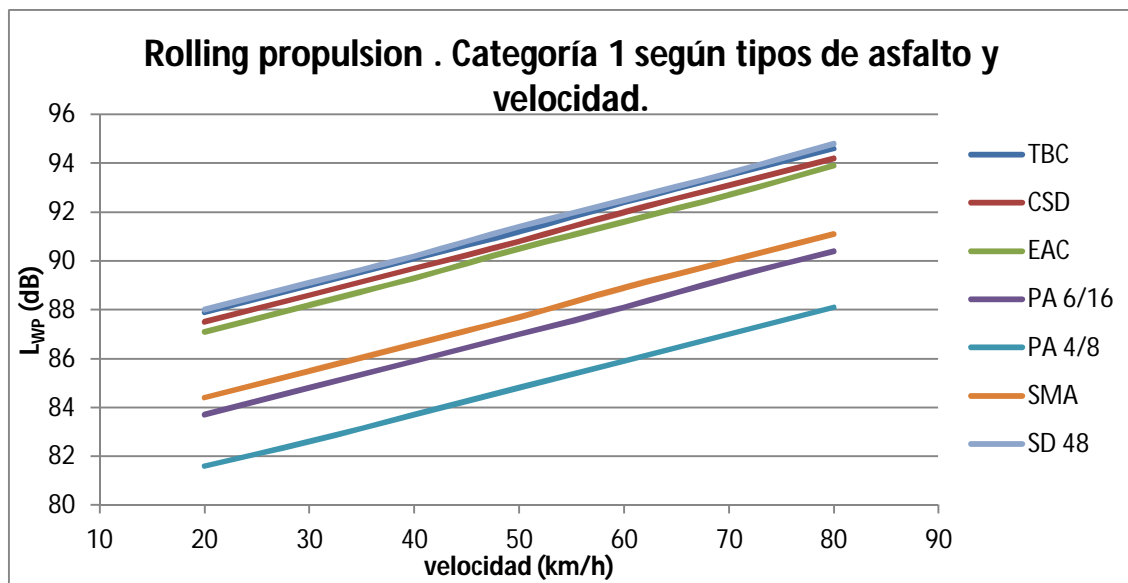


Fig. 2. 4

### 2.1.2. CLASIFICACIÓN DE ASFALTOS

El tipo de superficie de rodadura, influye en el ruido de emisión de los vehículos.

En dos pasos del mismo vehículo, a la misma velocidad pueden darse diferencias de más de 15 dBA, cuando el ruido de rodadura es predominante.

En Europa cada país, o cada región han ido implantando diferentes materiales y métodos de construcción de carreteras. Por eso no hay una tabla de materiales estandarizada.

Por ello, CNOSSOS en su guía de uso, determina el proceso para calcular los coeficientes de cada carretera.

En este proyecto distinguiremos 7 tipos de superficie, expuestos en el anterior CNOSSOS y pertenecientes a materiales utilizados en Holanda.

Son los siguientes:

- TBC: Transversely Brushed Concrete
- CSD 2/4: Concrete with Surface Dressing 2/4
- EAC: Exposed Aggregate Concrete
- PA 6/16: Porous Asphalt 6/16
- 2PA 4/8-11/16: 2 layer Porous Asphalt 4/8-11/16
- SMA 0/6: Stone Mastic Asphalt 0/6
- SD 4/8: Surface Dressing 4/8

Conociendo el tipo de asfalto, conocemos los coeficientes utilizados en las fórmulas de corrección de ruido.

Observando las gráficas de propulsión y rolling según velocidad y asfalto, se observan las diferencias.

### 2.1.3. NÚMERO Y POSICION DE LAS FUENTES SONORAS EQUIVALENTES

Para el cálculo del ruido de propagación y para determinar la potencia sonora emitida es necesario describir el vehículo con una o varias fuentes puntuales.

En este método cada vehículo (de categorías 1,2,3 y 4) es representado por una sola fuente.

En la siguiente figura se muestra como la fuente sonora se encuentra a 0.05 m por encima de la superficie de la carretera.

A esta fuente se le sumarán tanto la contribución de "rolling noise" (o ruido de rodadura) como la de "propulsion noise" (o ruido de propulsión). Los vehículos de dos ruedas únicamente serán representados con una fuente sonora puntual, ya que la contribución de rolling noise para ellos se puede despreciar.

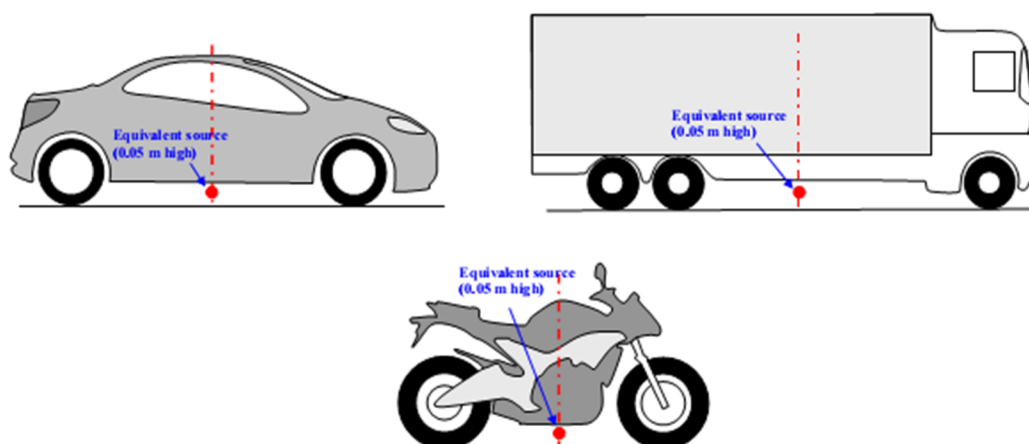


Fig. 2. 5

"Posición de la fuente puntual equivalente para vehículos ligeros (categoría 1) pesados (categorías 2 y 3) y motocicletas (categoría 4)".

## 2.2. Emisión de la potencia sonora

### 2.2.1. CONSIDERACIONES GENERALES. TRÁFICO FLUIDO Y VEHÍCULO INDIVIDUAL.

#### 2.2.1.1. Tráfico fluido.

Para facilitar la legibilidad en lo que sigue, los subíndices  $i$  y  $m$  se omitirán, aunque estarán implícitos en todos los indicadores

Es decir, todos los niveles de potencia sonora y coeficientes de corrección se expresan para cada categoría  $m$  ( $m=1, \dots, 4$ ) y para cada banda de tercio de octava  $i$  ( $i=1, \dots, 27$ ) en el rango de 25 Hz a 10 kHz.

La emisión de ruido del tráfico fluido es representada por una fuente lineal, cuya unidad es la potencia sonora por unidad de longitud, esto es, dB/m. Esto se corresponde con el sumatorio del sonido emitido por cada vehículo individual, teniendo en cuenta el tiempo que tarda cada vehículo en realizar la considerada sección de la vía.

El ruido emitido por el flujo de tráfico en términos de fuente lineal equivalente es definido por la siguiente fórmula:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

Ecuación 2. 1

donde:

- “ $L_{W,eq,line}$ ” es el nivel de potencia sonora media por unidad de longitud, en términos de fuente lineal equivalente, en dB/m (ref.  $10^{-12}$  W).
- “ $L_{W,0}$ ” es el nivel de potencia sonora direccional e instantánea de la para un único vehículo acorde con las fórmulas anteriores.
- “ $N$ ” son el número de vehículos durante el tiempo “ $T$ ” (en segundos).
- “ $V$ ” es la velocidad media, en m/s.

En el caso de que las unidades sean dadas en kilómetros la ecuación es:

$$L_{W,eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg \left( \frac{Q}{1000 \times v} \right)$$

Ecuación 2. 2

donde:

- “ $Q$ ” es la cantidad de vehículos en una hora.
- “ $v$ ” es la velocidad media en Km/h.

Por aplicación de esta última fórmula, las contribuciones para el ruido de rodadura,  $L_{WR}$ , y de propulsión,  $L_{WP}$ , se calculan separadamente y se distribuyen sobre la posición vertical de la fuente, tal como se describió anteriormente.

#### 2.2.1.2. Vehículo individual

El modelo de ruido para tráfico rodado define la producción de ruido instantánea de un vehículo en función de dos parámetros generales (categoría y velocidad) y lo corrige para efectos medioambientales o específicos. Los cálculos se llevan a cabo con distintas velocidades para categorías 1, 2, 3 y 4.

Para cada vehículo, el modelo de emisión consiste en una serie de ecuaciones matemáticas representando las dos fuentes sonoras generales:

- Rolling noise: debido a la interacción de la rueda con el asfalto.
- Propulsion noise: producido por el tipo, el estado, las revoluciones... del motor del vehículo .

El efecto del ruido producido por la aerodinámica puede ser despreciado y se considerará como parámetro influyente solo para altas velocidades.

La expresión general para el nivel de potencia sonora emitida por una de las fuentes (rolling o propulsion) en función de la velocidad  $v$  ( $20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$ ) es la siguiente:

$$L_{W,i,m}(v) = A_{i,m} + B_{i,m} \cdot f(v)$$

Ecuación 2. 3

donde:

- " $L_{W,i,m}(v)$ " es el nivel de potencia sonora
- " $i$ " es la frecuencia en bandas de tercio de octava
- " $m$ " es la categoría
- " $v$ " es la velocidad
- " $f(v)$ " es una función de la velocidad

$f(v)$  es una función logarítmica de la velocidad para el caso de ruido aerodinámico y de rodadura. Es una función lineal de la velocidad para el ruido de propulsión. En los vehículos de dos ruedas (categoría 4) solo se considera ruido de propulsión.

Para vehículos ligeros, medios y pesados (categorías 1,2 y 3), la potencia sonora corresponde a la suma de energía del ruido de rodadura y de propulsión.

Así, el nivel de potencia sonora ( $L_{W,i,m}$ ) para  $m=1,2$  o 3 es definido por:

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \times \lg \left( 10^{L_{WR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10} \right)$$

Ecuación 2. 4

donde:

- " $L_{WR,i,m}$ " es el nivel de potencia sonora para rolling noise.
- " $L_{WP,i,m}$ " es el nivel de potencia sonora para propulsion noise.
- " $\Delta L_{W,dir,i,m}$ " aporta el valor de la directividad de las fuentes.

### 2.2.1.3. Condiciones de referencia

Tanto las ecuaciones de la fuente como los coeficientes fueron derivados para ser válidos bajo condiciones de referencia para meteorología y situación del tráfico.

Las condiciones son las siguientes:

- Velocidad constante.
- Superficie llana.
- Temperatura del aire de 20 °C .
- Calzada de referencia, consistente en la mezcla de DAC 0/11 y SMA 0/11 con un uso de entre dos y siete años y con condiciones representativas de mantenimiento.
- La superficie de la carretera no estará húmeda.
- El tráfico representará una media de vehículos existente en las carreteras europeas.
- Ruedas sin clavos.

## 2.3. Rolling Noise

### 2.3.1. ECUACIÓN GENERAL

Para Rolling noise, se empleará una relación logarítmica entre el ruido de rodadura y la velocidad, que esta generalmente validada y aceptada. El nivel de potencia sonora  $L_{WR}$  es expresado por la siguiente fórmula:

$$L_{WR,j,m} = A_{R,j,m} + B_{R,j,m} \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,j,m}(v_m)$$

Ecuación 2. 5

Los coeficientes  $A_R$  y  $B_R$  se adjuntan en el anexo 2.1, en bandas de tercio de octava para cada una de las categorías y para una velocidad de referencia de  $v_{ref}= 70$  km/h.

En la siguiente figura se muestra el nivel global de Rolling noise para distintas categorías, en función de la velocidad. El material de la calzada es TBC.

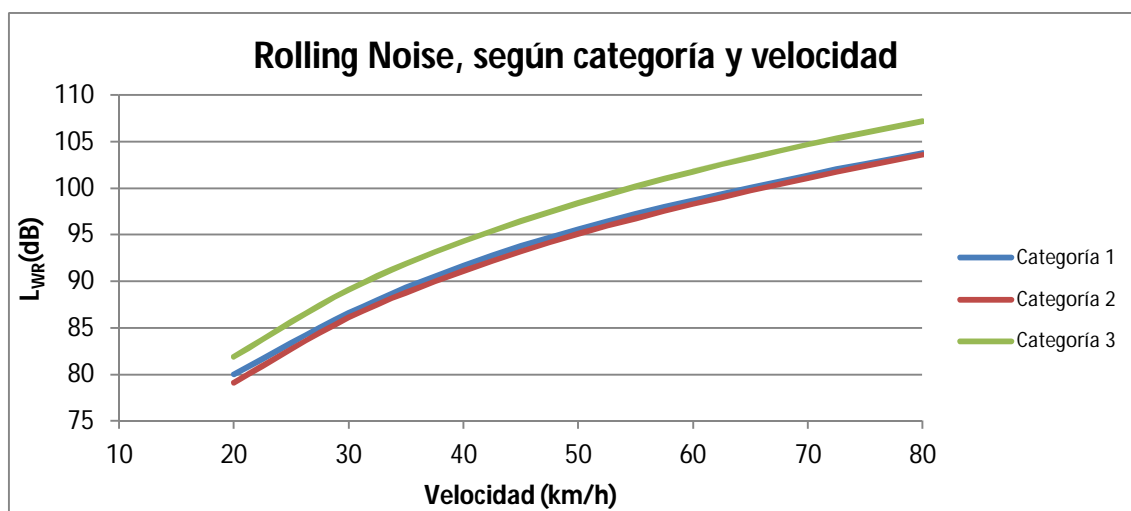


Fig. 2. 6

Se observa que el nivel aumenta con la velocidad de forma logarítmica. Los valores van desde 78 dBA a 20 km/h, de la categoría 1 hasta los 107 a 80 km/h de la categoría 3.

En la ecuación anterior el sumando  $\Delta L_{WR,i,m}$  corresponde a la suma de los diferentes coeficientes de corrección aplicados al rolling noise, dependiendo de las especificaciones de la calzada o del vehículo, que no siguen el patrón de las condiciones generales.

$$\Delta L_{WR,j,m}(v_m) = \Delta L_{WR,road,j,m}(v_m) + \Delta L_{studde d tyres,j,m=1}(v_m) + \Delta L_{WR,acc,j,m} + \Delta L_{W,temp}(\tau)$$

Ecuación 2. 6

### 2.3.2. CORRECCIONES

#### 2.3.2.1. Corrección por tipo de calzada.



$\Delta L_{WR,road,i,m}$  se refiere a la corrección del efecto del ruido de rodadura en superficies con diferentes propiedades.

Esta corrección se trata de la más importante de todas.

Se explica más detalladamente en el apartado: 2.4.2.1

### 2.3.2.2. Otras correcciones.

$\Delta L_{studded\ tyres,i,m=1}$  es la corrección aplicada a los vehículos ligeros equipados con ruedas con clavos. Apartado 2.4.2.3.

$\Delta L_{WR,acc,i,m}$  esta corrección se refiere al ruido generado en cruces con tráfico o rotondas por los vehículos ligeros al variar de velocidad. Apartado 2.4.2.4.

$\Delta L_{w,temp(\tau)}$  es la corrección aplicada dependiendo de la temperatura media, respecto de la temperatura de referencia.  $\tau_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Apartado 2.4.2.5.

A continuación se muestra una gráfica comparativa del Nivel de Rolling Noise según velocidad y categoría del vehículo.

En este proyecto estos conceptos han sido despreciados por ser mínima su incidencia.

## 2.4. Propulsion noise.

### 2.4.1. ECUACIÓN GENERAL.

La emisión de "Propulsion noise" incluye todas las contribuciones del motor, tubo de escape, engranajes, turbo, filtro de aire... La fórmula para el cálculo del nivel sonoro es la siguiente:

$$L_{WP,j,m} = A_{P,j,m} + B_{P,j,m} \times \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,j,m}(v_m)$$

Ecuación 2. 7

Los coeficientes  $A_R$  y  $B_R$  se adjuntan en el anexo 2.1 en bandas de tercio de octava para cada una de las categorías y para una velocidad de referencia de  $v_{ref} = 70\text{ km/h}$ . Están definidos bajo las condiciones de referencia descritas en el 2.2.1.3.

$\Delta L_{WP,i,m}$  corresponde a la suma de los coeficientes de corrección aplicados a la emisión del ruido de propulsión, para las condiciones específicas de los pasos, que no se asemejan a las condiciones de referencia.

$$\Delta L_{WP,j,m}(v_m) = \Delta L_{WP,road,j,m}(v_m) + \Delta L_{WP,acc,j,m} + \Delta L_{WP,grad,j,m}(v_m)$$

Ecuación 2. 8

$\Delta L_{WP,road,i,m}$  se refiere al efecto del tipo de superficie de la carretera. Incluye el efecto de la propagación de una superficie porosa. Se describe en el apartado 2.4.2.1.

$\Delta L_{WP,acc,i,m}$  y  $\Delta L_{WP,grad,i,m}$  se refieren a las desviaciones relacionadas con las condiciones de conducción del vehículo, se describen en los apartados 2.4.2.4 y 2.4.2.6.

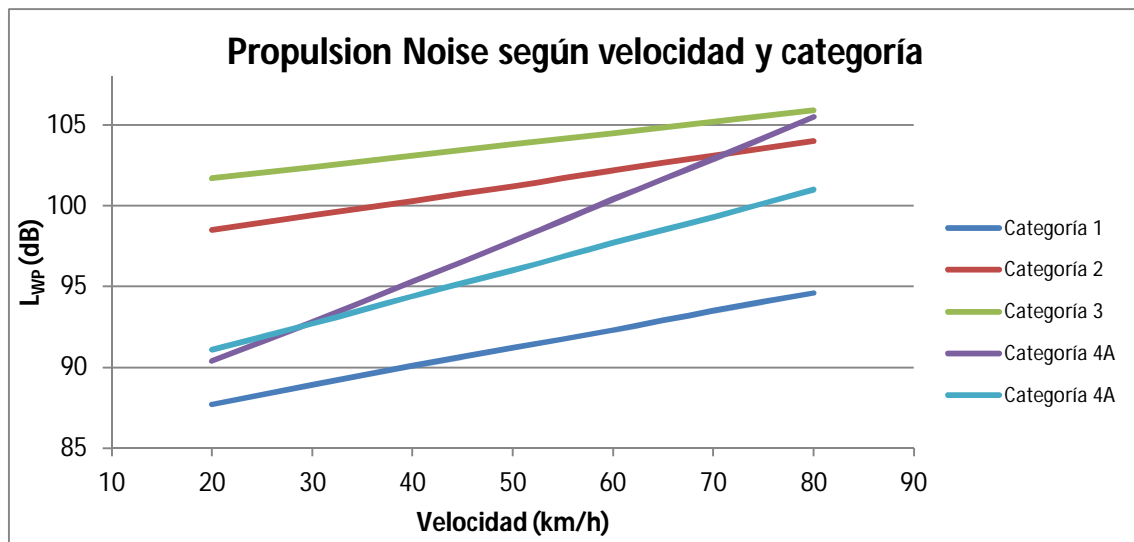


Fig. 2.7

Se observa en la gráfica que el ruido (salvo alguna excepción) aumenta con la categoría y con la velocidad. En el rolling el tipo de asfalto es más característico que en este caso. Como se ve es importante clasificar bien los vehículos, ya que de lo contrario se podría producir errores de hasta 15 dBA.

Cabe destacar la pendiente pronunciada producida por los vehículos de categoría 4. De hecho si se produjese un error al clasificar la velocidad en esta categoría podría darse una diferencia de 16 dBA. En las demás categorías el error nunca pasa de 7 u 8 dBA.

## 2.4.2. CONTRIBUCIÓN DE LAS DISTINTAS CORRECCIONES

Respecto a la versión anterior de CNOSSOS se han simplificado el número de correcciones.

### 2.4.2.1. Corrección por tipo de calzada.

El tipo de superficie de la calzada influye significativamente en la emisión de ruido de un vehículo. Se pueden observar diferencias superiores a 15 dB(A) para el mismo vehículo y la misma velocidad en condiciones en las que el rolling noise es predominante.

Son muchas las variedades de calzada utilizadas en toda Europa. Actualmente no existe un procedimiento común para evaluar las propiedades acústicas de las superficies de calzadas, aunque existen organizaciones que están comprobando y monitorizando superficies.

Sus características afectan generalmente a la emisión de rolling noise, pero las superficies porosas y absorbentes llegan a influir en la propagación tanto de rolling como de propulsion noise.

En la práctica normal el efecto de la superficie es evaluado cumpliendo los procedimientos estandarizados internacionales, para comparar el nivel de presión sonora, incluyendo los efectos de la fuente y de la propagación.

Por lo tanto, los factores de corrección propuestos en este método para el efecto de la superficie de la carretera incluyen implícitamente el efecto de la superficie en la reflexión local del sonido.

La emisión de rolling noise definida en el apartado "2.3 Rolling noise", junto a los coeficientes del anexo 2.1, es válida para una condición virtual de referencia definida en la sección "2.2.1.3 Condiciones de referencia". Para otros tipos de calzada se recomienda aplicar un procedimiento de corrección que distingue los vehículos en categorías y ofrece los valores en función de la frecuencia.

El efecto del tipo de calzada para la emisión de rolling noise se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta L_{WR,road\ i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right)$$

Ecuación 2. 9

donde:

- $\alpha_{i,m}$  es la corrección espectral en dB a la velocidad de referencia ( $v_{ref}$ ) para categorías 1, 2 y 3 ( $m=1, 2, 3$ ), en bandas de tercio de octava ( $i=50-10000\text{Hz}$ ).
- $\beta_m$  es el efecto de la velocidad en la reducción de rolling noise. Aunque este coeficiente principalmente depende de la frecuencia, en este método no se ofrecen datos por frecuencias y se asume un valor constante.

Los coeficientes  $\alpha_{i,m}$  y  $\beta_m$  se aportan en el anexo 2.4.

En el caso de que la superficie sea porosa, el factor de corrección aplicado en el propulsion noise es:

$$\Delta L_{WP,road\ i,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\}$$

Ecuación 2. 10

Para superficies densas no existe corrección del tipo de carretera en la emisión de propulsion noise. Para superficies porosas, la corrección es idéntica a la de rolling noise a velocidad de referencia, pero con un máximo de cero. Por lo tanto, estas últimas pueden disminuir los valores de propulsion noise, mientras que las densas no llegarán a incrementarlos.

#### 2.4.2.2. Age effect

Las características acústicas de las carreteras varían con la edad y con el nivel de mantenimiento aplicado sobre ellas. La vida acústica de las calzadas poco ruidosas es por lo general menor que para las de propiedades densas, especialmente para las superficies de hormigón.

El procedimiento para evaluar y obtener los coeficientes característicos de cada carretera, se pueden obtener siguiendo el proceso descrito en "Guidelines for the competent use of CNOSSOS-EU" del documento CNOSSOS 2012.

### 2.4.2.3. Studded tyres

En situaciones donde un número significativo de vehículos incorporan neumáticos con clavos durante los meses más fríos, el efecto de estos debe ser considerado en el rolling noise.

La influencia de este efecto en la emisión de rolling noise  $L_{WR}$  para vehículos de categoría 1 puede ser corregida por el parámetro  $\Delta_{stud,j,m=1}$  (en dB).

$$\Delta_{stud,j,m=1}(v_{m=1}) = \begin{cases} a_i + b_i \times \lg(v_{m=1}/70) & \text{for } 50 \leq v_{m=1} \leq 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \lg(90/70) & \text{for } v_{m=1} > 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \lg(50/70) & \text{for } v_{m=1} < 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

Ecuación 2. 11

donde:

- "a" y "b" son coeficientes que se aportan en el anexo 2.3, para cada banda de tercio de octava.

El incremento del ruido de rolling noise atribuido al uso de neumáticos con clavos, se da solo a lo largo de un periodo determinado (en meses) a lo largo del año.

$Q_{stud}$  es la media de vehículos equipados con clavos por hora durante el periodo  $T_s$  (meses)

$Q_1$ , es el volumen de tráfico total por hora.

Entonces la media de vehículos equipados con neumáticos de clavos es expresado:

$$p_s = \frac{Q_{stud}}{Q_1} \times \frac{T_s}{12}$$

Ecuación 2. 12

Por tanto el resultado final de la corrección aplicada al nivel de emisión de rolling noise producido por neumáticos con clavos para vehículos ligeros es:

$$\Delta L_{studded\ tyres,j,m=1}(v_{m=1}) = 10 \times \lg \left[ (1 - p_s) + p_s 10^{\frac{\Delta_{stud,j,m=1}(v_{m=1})}{10}} \right]$$

Ecuación 2. 13

#### 2.4.2.4. Aceleración

La aceleración y desaceleración de los vehículos puede tener un efecto significativo en la emisión del ruido de los vehículos, especialmente cerca de cruces e intersecciones de caminos. Sin embargo, cuando se trata de tráfico fluido, este efecto es mucho más difícil de calcular que para vehículos individuales, ya que depende del comportamiento de estos vehículos, la ubicación, el tiempo, las condiciones del tráfico, etc...

La incertidumbre sobre la estimación de la aceleración del tráfico puede ser mayor que el efecto sobre el ruido. Por lo tanto, en la mayoría de las situaciones, el efecto de la aceleración y la deceleración se puede despreciar a los efectos de la elaboración de mapas estratégicos de ruido:  $\Delta L_{WR,acc,i,m}=0$  y  $\Delta L_{WP,acc,i,m}=0$ .

Sin embargo, se podría considerar la aceleración / deceleración con el fin de integrar el efecto de la reducción del ruido.

Por eso una corrección puede ser aplicada antes y después de los cruces con semáforos y rotondas que se describen a continuación.

Para el Rolling Noise y el Propulsion Noise las correcciones de aceleración y desaceleración

$\Delta L_{WR,acc,i,m}$  y  $\Delta L_{WP,acc,i,m}$  se desarrollan a partir de una serie de cálculos, basados en la distancia  $x$  (en metros) de la fuente puntual a la intersección más próxima, de la fuente.

El término de corrección se atribuye a todas las bandas de octava por igual:

$$\Delta L_{WR,acc,i,m} = C_{R,m,k} \times \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right)$$

$$\Delta L_{WP,acc,i,m} = C_{P,m,k} \times \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right)$$

#### Ecuación 2. 14

Los coeficientes  $C_{R,m,k}$  and  $C_{P,m,k}$  dependen del tipo cruce, siendo  $k=1$  para semáforos, y  $k=2$  para rotondas. Dichos coeficientes se aportan en el anexo 2.2.

Dicha corrección incluye el efecto del cambio de velocidad tanto cuando se acerca el vehículo como cuando se aleja del cruce.

Debe tenerse en cuenta que a una distancia  $|x| \geq 100\text{m}$ ,  $\Delta L_{WR,acc,i,m} = \Delta L_{WP,acc,i,m} = 0$ .

### 2.4.2.5. Temperatura

La temperatura del aire afecta en el rolling noise; el nivel de potencia sonora disminuye cuando aumenta la temperatura del aire. Las correcciones según el tipo de superficie suelen ser evaluados a una temperatura del aire de referencia  $T_{ref} = 20^\circ \text{C}$ . En el caso de una temperatura promedio diferente, la corrección es de:

$$\Delta L_{W, temp}(\tau) = K \times (20 - \tau)$$

Ecuación 2. 15

El valor de la corrección es positiva (es decir, aumento de ruido) para temperaturas inferiores a  $20^\circ \text{C}$  y negativo (disminución de ruido) para temperaturas más altas. El coeficiente K depende de la superficie y de las características del neumático y en general muestra una relación con la frecuencia. Para fines estratégicos se utiliza un coeficiente genérico de  $K=0,08 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  para categoría 1 y  $0,04 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  para categorías 2 y 3.

No se aplica corrección para vehículos de categoría 4.

El coeficiente de corrección debe aplicarse por igual en todas las bandas de octava de 125 a 4000 Hz.

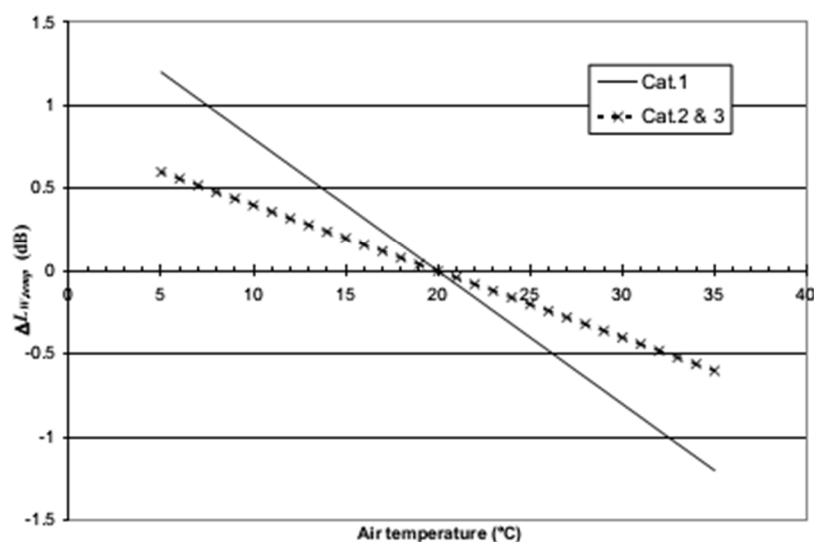


Fig. 2. 8

### 2.4.2.6. Efecto del gradiente de la carretera.

El gradiente de la carretera tiene dos efectos en la emisión de ruido. Primero, afecta en la velocidad del vehículo, por lo tanto en la emisión de rolling y propulsion noise. Segundo, afecta al funcionamiento del motor, por lo tanto en la emisión de propulsion noise.

Solo la segunda de estas características es considerada en esta sección, asumiendo una velocidad constante del vehículo.

El efecto del gradiente de la carretera en el ruido de propulsion  $\Delta L_{WP, grad}$ , depende de la pendiente  $s$  en (%), la velocidad  $v$  del vehículo (km/h) y la categoría  $m$ .

La corrección se aplica a todos tercios de octava.

$$\begin{aligned}
 \text{For } m=1 \quad \Delta L_{WP,grad,j,m=1}(v_m) &= \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\% ; -s) - 6\%}{1\%} & \text{for } s < -6\% \\ 0 & \text{for } -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\text{Min}(12\% ; s) - 2\%}{1.5\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{for } s > 2\% \end{cases} \\
 \text{For } m=2 \quad \Delta L_{WP,grad,j,m=2}(v_m) &= \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\% ; -s) - 4\%}{0.7\%} \times \frac{v_m - 20}{100} & \text{for } s < -4\% \\ 0 & \text{for } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min}(12\% ; s)}{1\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{for } s > 0\% \end{cases} \\
 \text{For } m=3 \quad \Delta L_{WP,grad,j,m=3}(v_m) &= \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\% ; -s) - 4\%}{0.5\%} \times \frac{v_m - 10}{100} & \text{for } s < -4\% \\ 0 & \text{for } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min}(12\% ; s)}{0.8\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{for } s > 0\% \end{cases} \\
 \text{For } m=4 \quad \Delta L_{WP,grad,j,m=4} &= 0
 \end{aligned}$$

Ecuación 2. 16

La corrección  $\Delta L_{WPgrad}$  incluye implícitamente el efecto de las pendientes en la velocidad. Por lo tanto, no se requiere una corrección separada para el ruido de rodadura.

Para mantener la coherencia del modelo de emisión de tráfico de ruido, la línea de la fuente debe estar dividida en segmentos con una limitada variación en la emisión de ruido (ver apartado VI.2.2.a de la fuente segmentación). En consecuencia, la pendiente de la carretera s gradiente no debe variar en más de 2% dentro de un segmento.

### 3. PROPAGACIÓN

A lo largo de este apartado se especifica un método para calcular la atenuación del ruido durante su propagación por el exterior.

Si se conocen las características de la fuente, este método ayuda a determinar el nivel de presión sonora de ruido que se detecta en un receptor, siempre que se den estas dos condiciones atmosféricas:

- Refracción descendente, desde la fuente al receptor.
- Condiciones atmosféricas homogéneas sobre todo el área de propagación.

Este método de cálculo se aplica a infraestructuras industriales y terrenos de infraestructuras de transporte. No proporciona resultados en condiciones de refracción ascendente.

El método proporciona resultados por banda de octava, de 63 Hz a 4 000 Hz. Para cada frecuencia central.

El límite de validez de los cálculos en términos de distancia es de 800 m de distancia a la carretera. Solo los puntos del receptor situado al menos 2 m de altura en relación con el suelo pueden tomarse en cuenta.

El método de cálculo se aplica a cualquier tipo de entorno: entorno rural, entorno urbano, incluyendo calles cerradas.

Los efectos de las bocas de los túneles no son tratados por este método.

Las difracciones sucesivas no se tratan en este documento, sino que se tratan como difracciones múltiples.

La aplicación de este documento asume un conocimiento detallado de:

- La topografía de los lugares.
- La geometría de la fuente y los obstáculos.
- Las características acústicas de los obstáculos
- La naturaleza del terreno
- La potencia acústica de las fuentes
- Las condiciones meteorológicas en la refracción descendente en todas o cada dirección de propagación que se trate.



### 3.1. Puesta en marcha

#### 3.1.1. DEFINICIONES

- Las distancias utilizadas en este documento están expresadas en metros (m).
- La notación MN representa la distancia entre los puntos M y N, unidos mediante una línea recta.
- La notación M^N representa la longitud de la trayectoria curvada entre los puntos M y N, en condiciones favorables.
- Las alturas medidas verticalmente se representan con la letra h.
- Las alturas medidas ortogonalmente en relación con el plano de tierra se representan con la letra z.
- Los niveles sonoros se representan con la letra L. Se expresan en decibelios (dB) por bandas de frecuencia.
- Se omite el índice A, de esta manera los dB de este documento son en realidad dBA.
- Para la suma de niveles se utiliza el signo  $\oplus$  de acuerdo con la siguiente definición:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \lg \left[ 10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right]$$

Ecuación 3. 1

#### 3.1.2. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

##### 3.1.2.1. Segmentación de la fuente.

Las fuentes reales se describen por varias fuentes puntuales o, en el caso del tráfico de trenes o tráfico rodado, por fuentes lineales incoherentes. Una fuente lineal se divide en segmentos lineales, que son representados por fuentes puntuales situadas en su centro.

El tiempo de cálculo puede ser reducido mediante la reducción del número de fuentes puntuales: esto se puede lograr utilizando segmentos más largos y, en el caso del tráfico por carretera, un reducido número de carriles.

##### 3.1.2.2. Trayectorias de propagación

Cnossos-UE funciona con un modelo geométrico que consiste en un conjunto conectado al suelo y las superficies de los obstáculos. Una trayectoria de propagación es un plano vertical a través del receptor y una fuente puntual.

##### 3.1.2.3. Cálculo del plano medio.

En el plano de la trayectoria, la topografía puede ser descrita por un conjunto de puntos discretos.  $(x_k, z_k)$ ;  $k \in \{1, \dots, n\}$ . Dichos puntos están separados linealmente, de acuerdo con los mínimos, de otro modo el cálculo del plano medio, sería erróneo.

La separación recomendada es de 1 m en la abscisa entre los puntos  $(x_k, z_k)$  y  $(x_{k+1}, z_{k+1})$ . La elección de un amplio espaciamiento debe ser justificada.

Se supone que la  $x$  aumenta desde la fuente al receptor. Cuando el conjunto disponible de puntos no están regularmente espaciados, un nuevo conjunto de puntos debe ser determinado como sigue:

$$\begin{cases} x_j = \frac{x_{k+1} - x_k}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2}} (j-1)s + x_k \\ z_j = \frac{z_{k+1} - z_k}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2}} (j-1)s + z_k \end{cases}$$

Ecuación 3. 2

donde  $s$  es el paso en metros.

Una característica principal de la serie de puntos producidos por la Ecuación 3.2 es que contiene los puntos de dispersión originales.

Puesto que, en general, un conjunto regular de puntos no se puede crear a partir de un conjunto de puntos que no es regular, el conjunto de puntos producidos por la Ecuación 3.2 coincide 'a la izquierda' con la dispersión original.

Un conjunto de puntos espaciados irregularmente también puede ser considerado válido definiendo una polilínea de segmentos rectos  $z_k = A_k X + b_k$ ,  $x \in [x_k, x_{k+1}]$ ;  $k \in \{1, \dots, n\}$ , y por lo tanto la línea recta  $z = ax + b$ ,  $x \in [x_1, x_n]$ , que se ajusta a la polilínea, puede ser expresada analíticamente de acuerdo con los mínimos cuadrados.

Se describe a continuación:

$$\begin{cases} A = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^3 - x_k^3) + \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) \\ B = \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1} - x_k) \end{cases}$$

Ecuación 3. 3

Con estas notaciones, la línea recta solicitada tiene los siguientes coeficientes:

$$\begin{cases} a = \frac{3(2A - B(x_n + x_1))}{(x_n - x_1)^3} \\ b = \frac{2(x_n^3 - x_1^3)}{(x_n - x_1)^4} B - \frac{3(x_n + x_1)}{(x_n - x_1)^3} A \end{cases}$$

Ecuación 3. 4

#### 3.1.2.4. Reflexiones en fachadas y otros obstáculos verticales.

Las contribuciones de las reflexiones se tienen en cuenta por la introducción de fuentes o receptores imaginarios.

### 3.1.3. MODELO DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO

### 3.1.3.1. Cálculo aproximado

Para un receptor R se realizan los cálculos de acuerdo con los siguientes pasos:

1. desglose de las fuentes de ruido en fuentes puntuales, sino se ha expresado como fuente puntual.
2. determinación de la potencia de sonido direccional por banda de frecuencia de cada fuente.
3. cálculo de la probabilidad de ocurrencia de condiciones favorables para cada trayectoria de fuente a receptor. ( $S_i$ , R);
4. la búsqueda de caminos de propagación entre cada fuente y receptor: directa, reflejada y / o rutas de difracción;
5. en cada camino de propagación:
  - Cálculo de la atenuación en condiciones favorables;
  - Cálculo de la atenuación en condiciones homogéneas;
  - Cálculo de la ocurrencia en condiciones favorables;
  - Cálculo del nivel sonoro a largo plazo para cada ruta;
6. acumulación de los niveles sonoros a largo plazo para cada trayectoria, por lo tanto el nivel sonoro total se calcula en el punto receptor.
7. sólo las atenuaciones debidas al efecto suelo ( $A_{ground}$ ) y difracción ( $A_{dif}$ ) se ven afectados por las condiciones meteorológicas.

### 3.1.3.2. Proceso de cálculo

Para una fuente puntual direccional S de potencia acústica  $L_{w,0,dir}$  y para una banda de frecuencia dada, el nivel de presión sonora en un punto receptor R en determinadas condiciones atmosféricas es obtenido de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

### 3.1.3.3. Nivel de ruido en condiciones favorables ( $L_F$ ) para una ruta de acceso (S, R)

$$L_F = L_{w,0,dir} - A_F$$

Ecuación 3. 5

El término  $A_F$  representa la atenuación total a lo largo de la trayectoria de propagación en condiciones favorables, y se desglosa de la siguiente manera:

$$A_F = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,F}$$

Ecuación 3. 6

- $A_{div}$  es la atenuación debida a la divergencia geométrica.
- $A_{atm}$  es la atenuación debida a la absorción atmosférica.
- $A_{boundary,F}$  es la atenuación debida a la frontera del medio de propagación en condiciones favorables. Puede contener los siguientes términos:

- $A_{\text{ground}, F}$ , que es la atenuación debida a la tierra en condiciones favorables.
- $A_{\text{dif}, F}$ , que es la atenuación debida a la difracción en condiciones favorables.

Para una trayectoria y una frecuencia determinada, los siguientes dos escenarios son posibles:

- O  $A_{\text{ground}, F}$  ( $A_{\text{dif}, F} = 0$  dB) se calcula sin difracción  $A_{\text{boundary}, F}$
- O se calcula  $A_{\text{dif}, F}$  ( $A_{\text{ground}, F} = 0$  dB). El efecto del suelo se tiene en cuenta en la ecuación  $A_{\text{dif}, F}$ . Por tanto, esto da  $A_{\text{boundary}, F} = A_{\text{dif}, F}$ .

#### 3.1.3.4. Nivel de ruido en condiciones homogéneas ( $L_H$ ) por un sendero (S, R)

El procedimiento es estrictamente idéntico al caso de condiciones favorables presentadas en la anterior sección.

$$L_H = L_{W,0,dir} - A_H$$

Ecuación 3. 7

El término  $A_H$  representa la atenuación total a lo largo de la trayectoria de propagación condiciones homogéneas y se desglosa de la siguiente manera:

$$A_H = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{boundary}, H}$$

Ecuación 3. 8

Donde:

- $A_{\text{div}}$  es la atenuación debida a la divergencia geométrica.
- $A_{\text{atm}}$  es la atenuación debida a la absorción atmosférica.
- $A_{\text{boundary}, H}$  es la atenuación debida a la frontera del medio de propagación en condiciones homogéneas. Puede contener los siguientes términos:
  - $A_{\text{ground}, H}$ , que es la atenuación debida a la tierra en condiciones homogéneas.
  - $A_{\text{dif}, H}$ , que es la atenuación debida a la difracción en condiciones homogéneas.

Para una trayectoria y frecuencia determinada se pueden dar los siguientes dos escenarios:

- O  $A_{\text{ground}, H}$  ( $A_{\text{dif}, H} = 0$  dB) se calcula sin difracción  $A_{\text{boundary}, H} = A_{\text{ground}, H}$ ;
- O se calcula  $A_{\text{dif}, H}$  ( $A_{\text{ground}, H} = 0$  dB). El efecto de suelo se tiene en cuenta la ecuación  $A_{\text{dif}, H}$ . Por tanto, esto da  $A_{\text{boundary}, H} = A_{\text{dif}, H}$

#### 3.1.3.5. Nivel de sonido a largo plazo de un camino (S, R)

El nivel de sonido a largo plazo a lo largo de una trayectoria a partir de una fuente puntual se obtiene haciendo la suma energética del nivel sonoro en condiciones homogéneas  $L_H$  y el nivel sonoro en condiciones favorables  $L_F$ .

Estos niveles de ruido se ponderan según su ocurrencia media  $p$  condiciones favorables en la dirección de la trayectoria (S, R):

$$L_{LT} = 10 \times \lg \left( p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right)$$

Ecuación 3. 9

- El término  $p$  se da en porcentajes. Por ejemplo si la ocurrencia es de 87 %.  $P=0.87$ .

### 3.1.3.6. Nivel de sonido a largo plazo en el punto R para todas las rutas

El nivel de sonido a largo plazo en el receptor para una banda de una sola frecuencia se obtiene mediante la suma energética de las contribuciones de todas las rutas de N, todos los tipos incluidos:

$$L_{tot,LT} = 10 \times \lg \left( \sum_n 10^{\frac{L_{n,LT}}{10}} \right)$$

Ecuación 3. 10

Donde:

- n es el índice de los caminos entre S y R.

Si S' es la fuente de la imagen de S, entonces la ocurrencia p' de la trayectoria (S', R) es igual a la p ocurrencia de la ruta (S, R).

### 3.1.3.7. Nivel sonoro a largo plazo en el punto R en decibelios A (dBA).

El nivel total de sonido en decibelios A (dBA) se obtiene sumando los niveles en cada banda de frecuencia:

$$L_{Aeq,LT} = 10 \times \lg \sum_i 10^{\left( \frac{L_{tot,LT,i} + AWC_{f,i}}{10} \right)}$$

Ecuación 3. 11

Donde

- i es el índice de la banda de frecuencia. AWC es la corrección de ponderación de acuerdo con la norma internacional IEC 61672:2003.

Este nivel  $L_{Aeq,LT}$  constituye el resultado final, es decir, nivel de presión sonora a largo plazo ponderado A nivel en el punto receptor en un intervalo de referencia de tiempo específico (por ejemplo, día o noche, o una franja de tiempo durante el día, la tarde o la noche, cuando se dan unas condiciones constantes.)

## 3.2. Análisis de propagación.

### 3.2.1. RECEPTOR

Los puntos del receptor no deben estar situados a menos de 2 m del suelo. Esta altura debe ser medida con una precisión de 0,10 m como mínimo para limitar cualquier incertidumbre en los resultados, sobre todo si hay difracción.

Por defecto, el método calcula los niveles de sonido sin tener la última reflexión en una fachada en cuenta para un receptor cerca de esta.

Para cumplir con los requisitos de la aplicación de la normativa vigente en materia de límites de ruido, Los receptores generalmente se deben colocar 2 m por delante de las fachadas del edificio. El efecto de fachada, si se tiene en cuenta, entonces se puede aproximar mediante:

- añadir una corrección predefinida de + 3 dB (A) a la  $L_{Aeq, LT}$  calculado.
- añadir una corrección más precisa en función de la frecuencia y las características del lugar.
- O el cálculo de la reflexión de acuerdo con el método descrito en la Sección 3.3.5

### 3.2.2. RUTAS PRIMARIAS DE PROPAGACIÓN

En el siguiente apartado se describen las 4 rutas de propagación posibles.

#### 3.2.2.1. Trayectorias tipo 1.

Son trayectorias directas desde la fuente hasta el receptor, las cuales son trayectorias rectas vistas desde arriba, aunque pueden influir difracciones en los bordes horizontales de los obstáculos (ver Imagen 3.1).

Estos son los escenarios más fáciles de tratar.

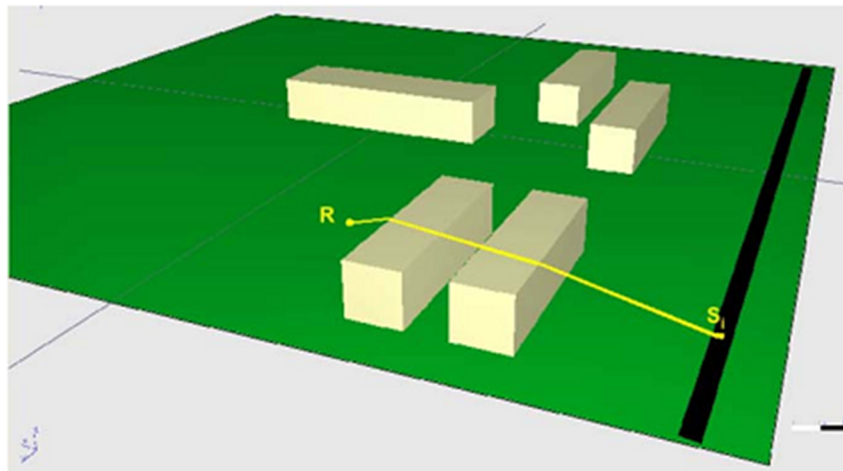


Fig. 3. 1

#### 3.2.2.2. Trayectorias tipo 2 vías.

Estas son trayectorias que son reflejadas en obstáculos verticales o inclinados ligeramente ( $<15^\circ$ ), como se muestra en la Imagen 3.2, también pueden influir difracciones en los bordes horizontales de los obstáculos (véase la imagen 3.3).

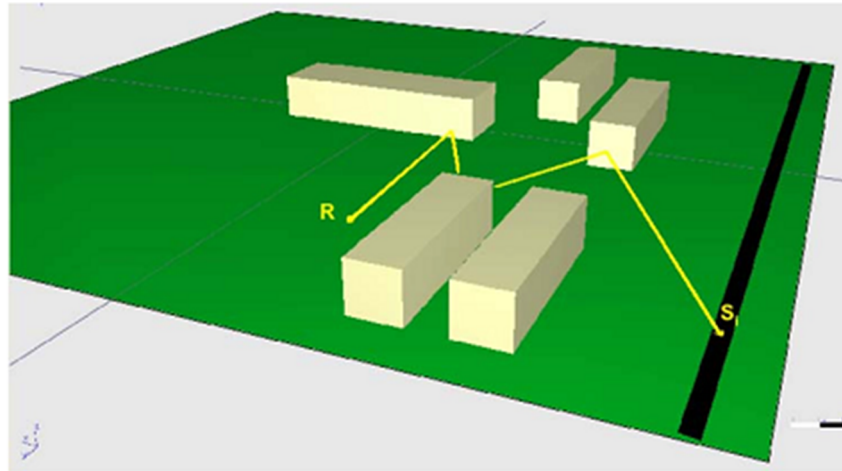


Fig. 3. 2

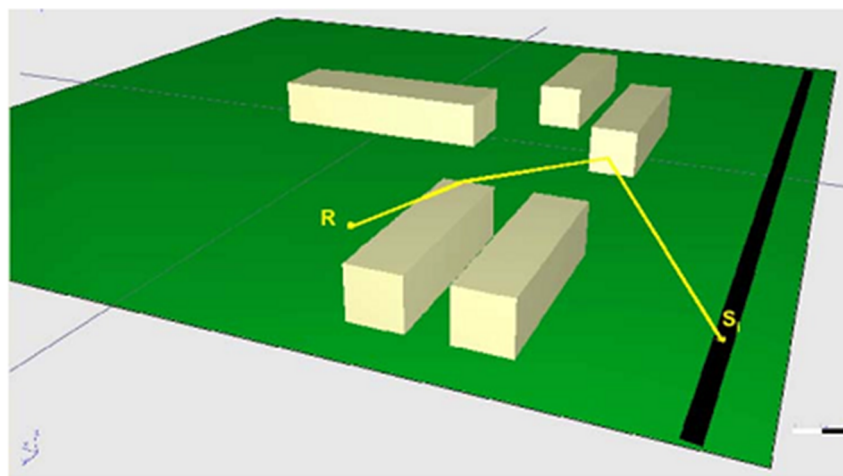


Fig. 3. 3

El principio consiste en aplicar el método de la imagen (véase la Sección 3.3.5). Una sección 2D de la geometría es creada en una sucesión de planos verticales que pasan a través de los segmentos rectos situados entre dos reflexiones. La sección se obtiene por desdoblamiento de estos planos, que se asemejan a un panel japonés, y las reflexiones se tienen en cuenta mediante la asignación de la potencia acústica de un término que tiene en cuenta el coeficiente de reflexión de cada superficie vertical encontrado. Si el orden es igual a 1, la potencia de  $L'_w$  para ser considerado se obtiene de acuerdo con la ecuación 3.34. Si el orden es igual a 2, la potencia de  $L''_w$  considerada se obtiene aplicando la ecuación 3.34 donde  $L_w$  se sustituye por  $L'_w$  y  $L'$  por  $L''_w$ . Esto continúa hasta que el orden requerido  $n$  es alcanzado. El cálculo se realiza entonces en la sección vertical 2D de acuerdo con las indicaciones de la sección.

### 3.2.2.3. Trayectorias tipo 3.

Estos son los caminos difractados por los bordes laterales de los obstáculos.



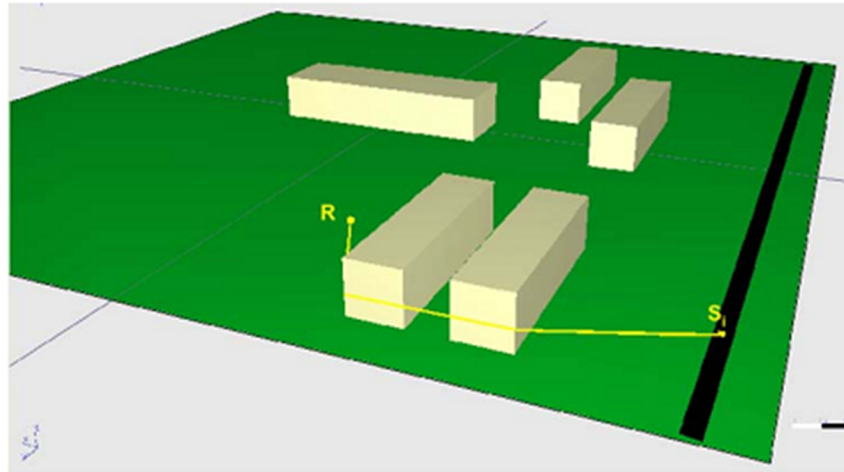


Fig. 3. 4

El principio es determinar cada término de la ecuación en condiciones homogéneas (Ecuación 3.32) y en la ecuación en condiciones favorables (Ecuación 3.33):

- el término  $\Delta_{\text{dif}}(S, R)$  se obtiene calculando la diferencia de camino  $\delta$  entre la trayectoria directa y la trayectoria convexa de los bordes laterales en el plano horizontal;
- el término  $A_{\text{ground}}$  se determina sin tener la presencia del obstáculo en cuenta.

#### 3.2.2.4. Trayectorias tipo 4.

Estas son las trayectorias mixtas que son difractadas por los bordes laterales de los obstáculos y reflejada por las superficies verticales ( $<15^\circ$ ).

El cálculo es por lo tanto el mismo que para el Tipo 3 rutas con una sencilla corrección sobre la fuente como para las trayectorias del tipo 2.

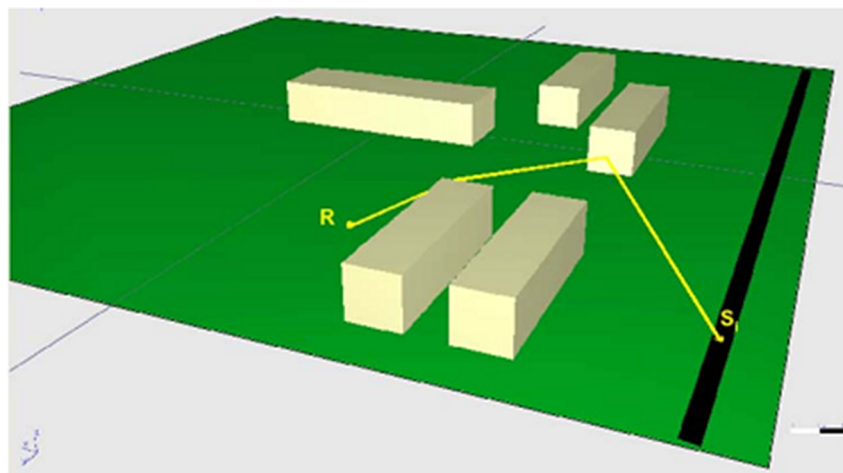


Fig. 3. 5

### 3.3. Cálculos sobre un camino elemental



Esta sección se aplica cuando la distancia euclídea entre la fuente y el receptor no supera los 2000 m.

### 3.3.1. DIVERGENCIA GEOMÉTRICA

La atenuación debida a la divergencia geométrica,  $A_{div}$ , corresponde a una reducción del nivel sonoro debido a la distancia. Para una fuente de sonido puntual en campo abierto, la atenuación en dB se da por:

$$A_{div} = 20 \times \lg(d) + 11$$

Ecuación 3. 12

- Donde d es la distancia directa entre la fuente y el receptor.

### 3.3.2. LA ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

La atenuación debida a la absorción atmosférica  $A_{ATM}$  durante la propagación a través de una distancia d está dada en dB por la ecuación:

$$A_{atm} = \alpha_{atm} \cdot d / 1000$$

Ecuación 3. 13

Donde:

- d es la distancia directa entre la fuente y el receptor en m;
- $\alpha_{atm}$  es el coeficiente de atenuación atmosférica en dB / km en la frecuencia central para cada banda de frecuencia, de acuerdo con la norma ISO 9613-1.

Los valores del coeficiente de  $\alpha_{atm}$  se indican para una temperatura de 15 ° C, una humedad relativa de 70% y una presión atmosférica de 101 325 Pa. Se calculan con las frecuencias centrales exactas de la banda de frecuencia. Estos valores cumplen con la norma ISO 9613-1. Uso de la temperatura y otros valores de humedad está permitido, siempre que éstos representan un promedio meteorológicos a largo plazo.

### 3.3.3. EFECTO DEL SUELO

La atenuación debida al efecto del suelo es principalmente el resultado de la interferencia entre la reflexión del sonido y el sonido que se propaga directamente desde la fuente al receptor. Está ligado a la absorción acústica del suelo cuando la onda viaja por encima. Sin embargo, también depende de las condiciones atmosféricas durante la propagación, los rayos de reflexión modifican la altura de la trayectoria sobre el suelo y hace que los efectos de la tierra y de los terrenos cercanos a la fuente sean más o menos significativos.

#### 3.3.3.1. Alturas representativas del suelo

Para tener en cuenta el relieve real de la tierra a lo largo de una trayectoria de propagación de la mejor manera posible, se introduce el concepto de «altura equivalente», que sustituye a las alturas reales en las ecuaciones del efecto del suelo.

En este documento, a las alturas reales sobre el suelo se representan con la letra  $h$  y la altura equivalente con la  $z$ . Las alturas equivalentes se obtienen del plano suelo entre la fuente y el receptor. Esto reemplaza el terreno real con un plano ficticio que representa el perfil medio de la tierra (véase la Figura 3.6). Las instrucciones para el cálculo del plano medio se dan en la Sección 3.1.2.

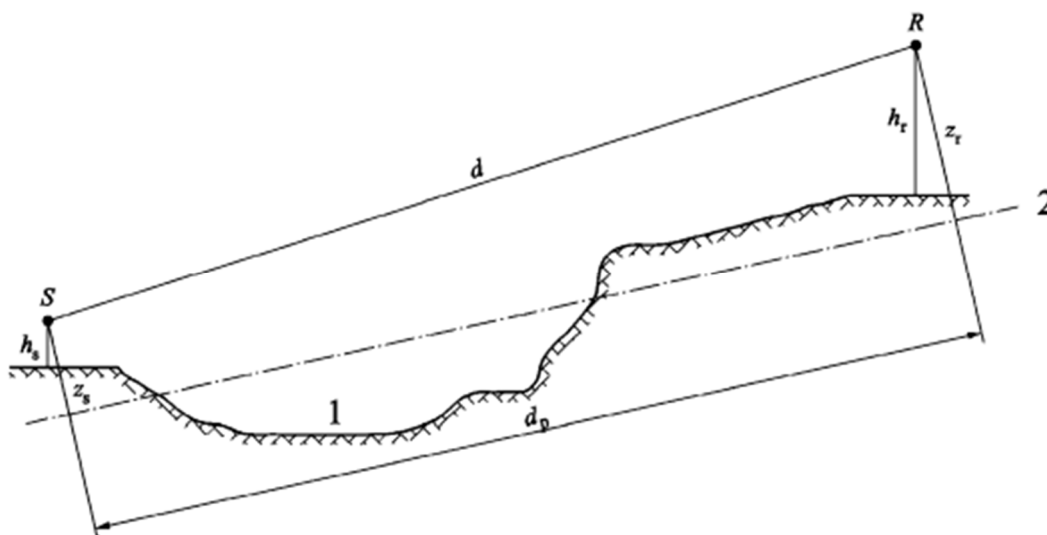


Fig. 3. 6

La altura equivalente de un punto es su altura ortogonal en relación a este plano medio. La distancia entre la fuente y el receptor en proyección sobre el plano se representa con la notación  $d_p$ .

### 3.3.3.2. Caracterización acústica de suelo

Las propiedades de absorción acústica de la tierra están vinculadas principalmente a su porosidad. El suelo compacto es generalmente poco reflectante y si es poroso es absorbente. Para los requisitos operacionales de cálculo, la absorción acústica de un suelo está representado por un coeficiente adimensional  $G$ , entre 0 y 1.  $G$  es independiente de la frecuencia. La Tabla 3.1 da los valores  $G$  de actividades al aire libre en tierra. En general, el promedio del coeficiente  $G$  sobre un camino de toma valores entre 0 y 1. Aquí la  $G$  representa la absorción media a lo largo de la ruta. Para un ejemplo, véase la 3.7.

Descripción	Tipo	KPa·s/2	Valor de G
Suelo muy blando (nieve o musgos)	A	12,5	1
Suelo de bosque blando(musgos cortos y densos)	B	31,5	1
Suelo sin compactar, suelto (césped,	C	80	1

hierba, tierra suelta)			
Suelo sin compactar (suelo de fincas, campo de pastos)	D	200	1
Terreno compactado y grava (césped compactado, zona parque)	E	500	0,7
Compactado tierra densa (camino de gravilla, aparcamiento)	F	2000	0,3
Superficies duras (asfalto normal, hormigón)	G	20000	0
Superficies muy duras y densas (asfalto denso, hormigón, agua)	H	200000	0

Tabla 3. 1

$G_{path}$  se define como la fracción de suelo absorbente presente sobre toda la trayectoria. Cuando la fuente y el receptor están cerca  $d_p \leq 30(z_s + z_r)$ , la distinción entre el tipo de terreno situado cerca de la fuente y el terreno situado cerca del receptor es insignificante. Si el receptor está muy cerca del borde de la plataforma de rodadura, un lado de recepción de tierra absorbente no debe ser considerado. Para tomar en cuenta esta observación, el factor de  $G_{path}$  es por lo tanto, corregida como sigue:

$$G'_{path} = \begin{cases} G_{path} \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} + G_s \left( 1 - \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} \right) & \text{if } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ G_{path} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ecuación 3. 14

donde  $G_s$  es el factor suelo del área de la fuente.  $G_s = 0$  para superficies de rodadura.  $G_s = 1$  para vías de ferrocarril. No hay un valor general para el caso de fuentes industriales.

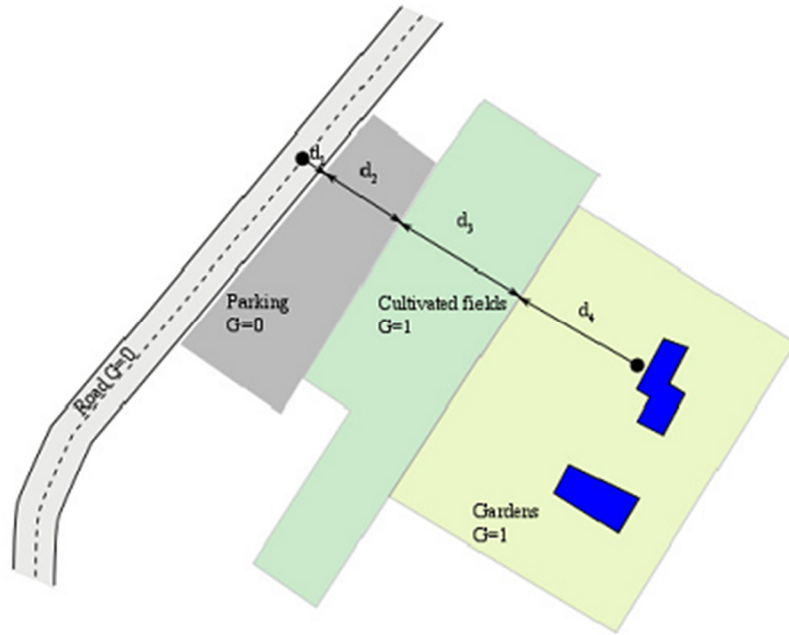


Fig. 3. 7

Ejemplo de determinación del coeficiente  $G_{path}$  suelo sobre una trayectoria de propagación

$$d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

$$G_{path} = \frac{(0 \cdot d_1 + 0 \cdot d_2 + 1 \cdot d_3 + 1 \cdot d_4)}{d} = \frac{(d_3 + d_4)}{d}$$

Ecuación 3. 15

En los apartados 3.3.3.3 y 3.3.3.4 se introduce los valores genéricos  $G_w$  y  $G_m$  para la absorción del suelo. Tabla 3.2 muestra la correspondencia entre estas notaciones y la  $G_{path}$  y  $G'_{path}$  variables.

	Homogeneous conditions			Favourable conditions		
	$A_{ground}$	$\Delta_{ground}(S,O)$	$\Delta_{ground}(O,R)$	$A_{ground}$	$\Delta_{ground}(S,O)$	$\Delta_{ground}(O,R)$
$\bar{G}_w$	$G'_{path}$		$G_{path}$			
$\bar{G}_m$	$G'_{path}$		$G_{path}$	$G'_{path}$		$G_{path}$

Tabla 3. 2

### 3.3.3.3. Cálculos en condiciones homogéneas

La atenuación debida al efecto suelo en condiciones homogéneas se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Si  $G_{path} \neq 0$

$$A_{ground,H} = \max \left( -10 \times \lg \left[ 4 \frac{k^2}{d_p^2} \left( z_s^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_s + \frac{C_f}{k} \right) \left( z_r^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_r + \frac{C_f}{k} \right) \right], A_{ground,H,min} \right)$$

Ecuación 3. 16

Donde

$$k = \frac{2\pi f_m}{c}$$

Donde  $f_m$  es la frecuencia central nominal de la banda de frecuencias considerada, en Hz,  $c$  es la velocidad del sonido en el aire, tomado igual a 340 m / s, y  $C_f$  se define mediante:

$$C_f = d_p \frac{1 + 3wd_p e^{-\sqrt{wd_p}}}{1 + wd_p}$$

Ecuación 3. 17

Donde el valor  $w$  es dado por la siguiente ecuación:

$$w = 0.0185 \frac{f_m^{2.5} \overline{G_w}^{-2.6}}{f_m^{1.5} \overline{G_w}^{-2.6} + 1.3 \cdot 10^3 f_m^{0.75} \overline{G_w}^{-1.3} + 1.16 \cdot 10^6}$$

Ecuación 3. 18

$\overline{G_w}$  puede ser igual a cualquier camino  $G_{path}$  o  $G'$  dependiendo de si el efecto de suelo se calcula con o sin difracción, y de acuerdo con la naturaleza del punto de origen.

$$A_{ground,H,min} = -3(1 - \overline{G_m})$$

Ecuación 3. 19

Es el límite inferior de  $A_{ground,H}$

Para una trayectoria ( $S_i$ ,  $R$ ) en condiciones homogéneas sin difracción:

$$\overline{G_w} = G'_{path}$$

$$\overline{G_m} = G'_{path}$$

Con difracción, consulte la Sección 3.5 para las definiciones de  $\overline{G_w}$  y  $\overline{G_m}$

Si  $G_{path} = 0$  :  $A_{ground,H} = -3$  dB

El término  $-3(1-G_m)$  toma en cuenta el hecho de que cuando la fuente y el receptor están muy alejados, la primera reflexión de la fuente ya no se encuentra en la plataforma, pero si en tierra natural.

### 3.3.3.4. Cálculo en condiciones favorables.

El efecto del suelo en condiciones favorables se calcula con la ecuación de  $A_{\text{ground, H}}$ , siempre que:

$G_{\text{path}} \neq 0$

- a) En la ecuación  $A_{\text{ground, H}}$ , los valores  $z_s$  y  $z_r$  son reemplazadas por  $z_s + \delta z_s + \delta z_T$  y  $z_r$  y  $\delta z_r + \delta z_T$  donde

$$\begin{cases} \delta z_s = a_0 \left( \frac{z_s}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} \\ \delta z_r = a_0 \left( \frac{z_r}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} \end{cases}$$

Ecuación 3. 20

$a_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  es el inverso del radio de curvatura.

$$\delta z_T = 6 \cdot 10^{-3} \frac{d_p}{z_s + z_r}$$

Ecuación 3. 21

- b) El límite inferior de  $A_{\text{ground, F}}$  depende de la geometría de la trayectoria:

$$A_{\text{ground, F, min}} = \begin{cases} -3(1 - \overline{G_m}) & \text{if } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ -3(1 - \overline{G_m}) \cdot \left( 1 + 2 \left( 1 - \frac{30(z_s + z_r)}{d_p} \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ecuación 3. 22

Si  $G_{\text{path}} = 0$

$A_{\text{ground, F}} = A_{\text{ground, F, min}}$

Las correcciones de altura y  $\delta z_s$  y  $\delta z_r$  transmiten el efecto del rayo de reflexión.  $\delta z_T$  influye en el efecto de la turbulencia.

$\overline{G_m}$  También puede ser igual a  $G_{\text{path}}$  o  $G'_{\text{path}}$  dependiendo de si el efecto de suelo es calculado con o sin difracción, y de acuerdo con la naturaleza de la fuente. Esto se especifica en los apartados siguientes.

Para una trayectoria ( $S_i$ , R) en condiciones favorables, sin difracción:

$$\overline{G_w} = G'_{\text{path}}$$

$$\overline{G_m} = G'_{\text{path}}$$

Con difracción, consulte la Sección 3.3.4 para las definiciones de  $\overline{G_w}$  y  $\overline{G_m}$ .

### 3.3.4. DIFRACCIÓN

Como regla general, la difracción debe ser estudiada en la parte superior de cada obstáculo situado en la trayectoria de la propagación. Si la trayectoria pasa 'suficientemente alto' por

encima del borde de difracción,  $A_{dif} = 0$  se puede establecer calculando la dirección, evaluando  $A_{ground}$  (Sección 3.3.3).

En la práctica, para cada frecuencia, la diferencia de camino  $\delta$  se compara con el valor  $-\lambda / 20$ . Si la diferencia de camino  $\lambda$  es menor que  $-\lambda / 20$ , no hay necesidad de calcular  $A_{dif}$  para la banda de frecuencia considerada. En otras palabras,  $A_{dif} = 0$ . De lo contrario, se calcula  $A_{dif}$  tal y como se describe en esta parte. Esta regla se aplica tanto para condiciones homogéneas como favorables y para la difracción tanto simple como múltiple.

Cuando, para una banda de frecuencias, se realiza un cálculo de acuerdo con el procedimiento descrito en esta sección,  $A_{ground}$  se establece como igual a 0 dB en el cálculo de la atenuación total. El efecto del suelo se tiene en cuenta directamente en la ecuación de difracción de cálculo general.

Las ecuaciones propuestas en este apartado se utilizan para procesar la difracción en las pantallas, pantallas delgadas, edificios, muros de tierra (naturales o artificiales), y por los bordes de los cortes y terraplenes, viaductos.

Cuando varios obstáculos de difracción se encuentran en un trayecto de propagación, son tratadas como una difracción múltiple mediante la aplicación del procedimiento descrito en la Sección 3.3.4.3.

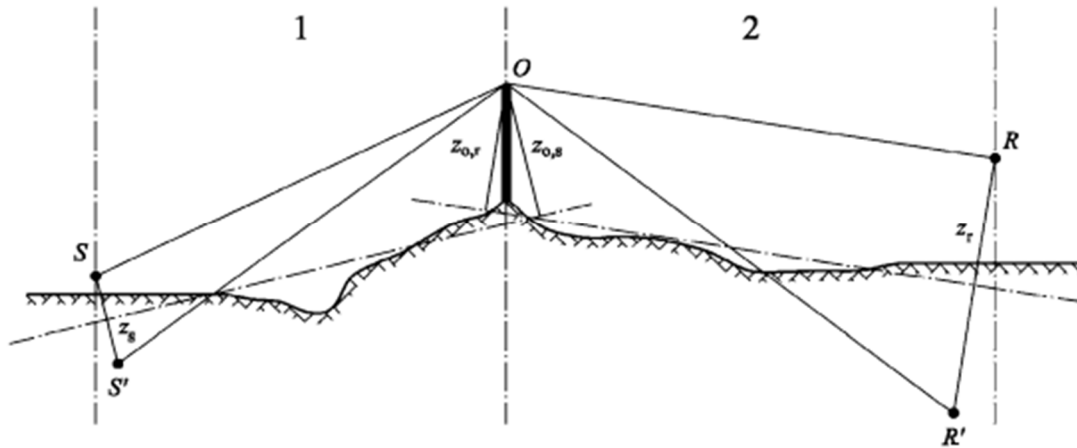
Los procedimientos presentados aquí se utilizan para calcular las atenuaciones tanto en condiciones homogéneas como favorables. La curvatura de los rayos se tiene en cuenta en el cálculo de la diferencia de la trayectoria y se calculan los efectos de la tierra antes y después de la difracción.

### 3.3.4.1. Principios generales

Imagen 3.8 ilustra el método general de cálculo de la atenuación debida a la difracción. Este método se basa en dividir la trayectoria de propagación en dos partes: la trayectoria del "lado de la fuente", situado entre la fuente y el punto de difracción, y la trayectoria del "lado receptor", situado entre el punto de difracción y el receptor.

Se calculan:

- El efecto del suelo, lado de la fuente,  $\Delta_{ground}(S, O)$
- El efecto del suelo, lado del receptor,  $\Delta_{ground}(O, R)$
- Y tres difracciones:
  - entre la fuente S y el receptor R:  $\Delta_{dif}(S, R)$
  - entre la imagen de la fuente S' y R:  $\Delta_{dif}(S', R)$
  - entre S y el receptor de imagen R':  $\Delta_{dif}(S, R')$



**Fig. 3. 8**  
 Geometría del cálculo de la atenuación debida a la difracción

1: Lado de la fuente  
 2: Lado del receptor

Donde:

- S es la fuente;
- R es el receptor;
- S' es la imagen de la fuente en relación con el plano del suelo del lado de la fuente;
- R' es la imagen del receptor en relación con el plano del suelo del lado del receptor;
- O es el punto de difracción;
- $z_s$  es la altura equivalente de la fuente S en relación con S';
- $z_{o,s}$  es la altura equivalente del punto de difracción O en relación con el plano del suelo del lado de origen;
- $z_R$  es la altura equivalente del receptor R en relación con el plano del suelo del lado del receptor;
- $z_{o,r}$  es la altura equivalente del punto de difracción O en relación con el plano del suelo del lado del receptor.

La irregularidad del terreno entre la fuente y el punto de difracción, y entre el punto de difracción y el receptor, se tiene en cuenta por medio de alturas equivalentes, calculadas en relación con el plano de masa medio, del lado de la fuente primero y segundo del lado del receptor, de acuerdo con el método descrito en la subsección 3.3.3.1.



### 3.3.4.2. Difracción pura

En la difracción pura, sin efectos de tierra, la atenuación está dada por:

$$\Delta_{dif} = \begin{cases} 10C_h \cdot \lg\left(3 + \frac{40}{\lambda} C^* \delta\right) & \text{if } \frac{40}{\lambda} C^* \delta \geq -2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ecuación 3. 23

Donde

$$C_h = \min\left(\frac{f_m h_0}{250}, 1\right)$$

Ecuación 3. 24

Donde

- $f_m$  es la frecuencia central nominal de una banda de frecuencias;
- $h_0$  es la mayor de dos alturas del borde de difracción en relación con cada uno de los dos planos del suelo, lado de la fuente y lado del receptor;
- $\lambda$  es la longitud de onda a la frecuencia central nominal de la banda de frecuencias considerada;
- $\delta$  es la diferencia de caminos entre la trayectoria difractada y la trayectoria directa
- $C^*$  es un coeficiente utilizado para tener en cuenta las múltiples difracciones:
  - $C^* = 1$  para un solo difracción.

Para una difracción múltiple, si  $e$  es la distancia total entre la difracción más cercana a la fuente y la difracción más cercana al receptor (ver Imágenes 3.9 y 3.11) y si  $e$  excede 0,3 m (dicho de otro modo  $C^* = 1$ ), este coeficiente se define por:

$$C^* = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{1/3 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}$$

Ecuación 3. 25

Los valores de  $\Delta_{dif}$  deberán ser:

- si  $\Delta_{dif} < 0$ :  $\Delta_{dif} = 0$  dB
- si  $\Delta_{dif} > 25$ :  $\Delta_{dif} = 25$  dB para una difracción en un borde horizontal. Este límite superior no se aplicará en el término  $\Delta_{dif}$  que intervienen en el cálculo de  $\Delta_{ground}$ , o para una difracción en un borde vertical (difracción lateral).

### 3.3.4.3. Cálculo de la diferencia de camino

La diferencia de camino  $\delta$  se calcula en un plano vertical que contiene la fuente y el receptor. Es una aproximación en relación con el principio de Fermat. La aproximación sigue siendo aplicable en este caso. La diferencia de camino  $\delta$  se calcula como se muestra en las figuras siguientes de la subsección 3.4.3.3 sobre la base de las diferentes situaciones encontradas.

### 3.3.4.3.1. Condiciones homogéneas

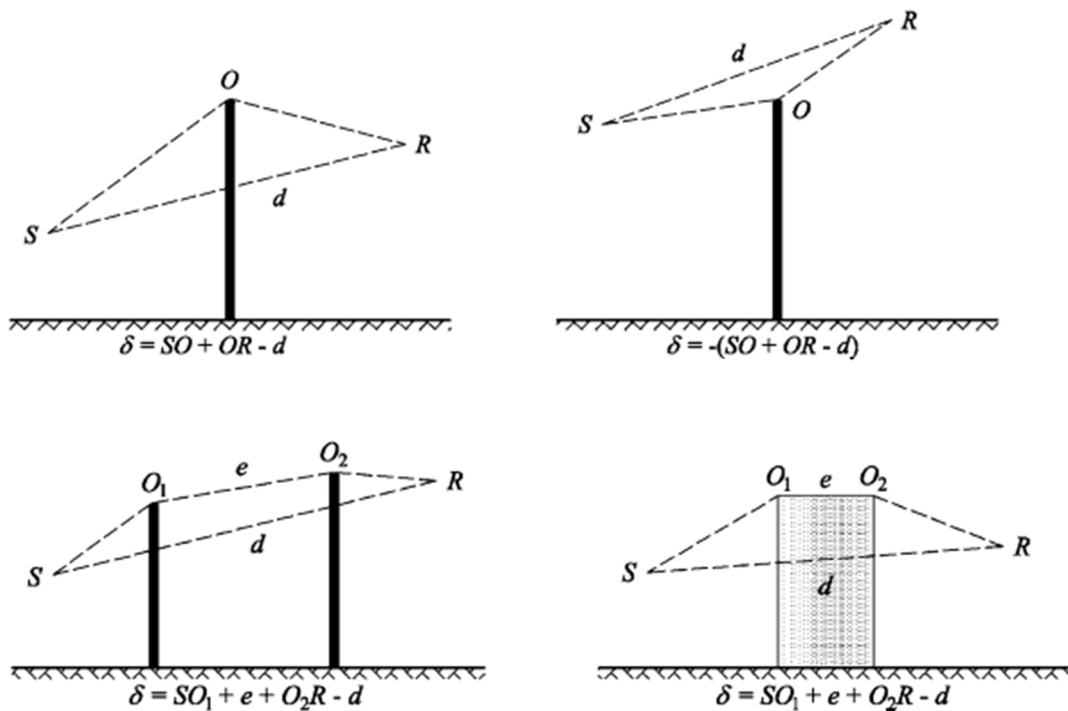


Fig. 3. 9

Cálculo de la diferencia de caminos en condiciones homogéneas. O, O1 y O2 son los puntos difracción

### 3.3.4.3.2. Condiciones favorables

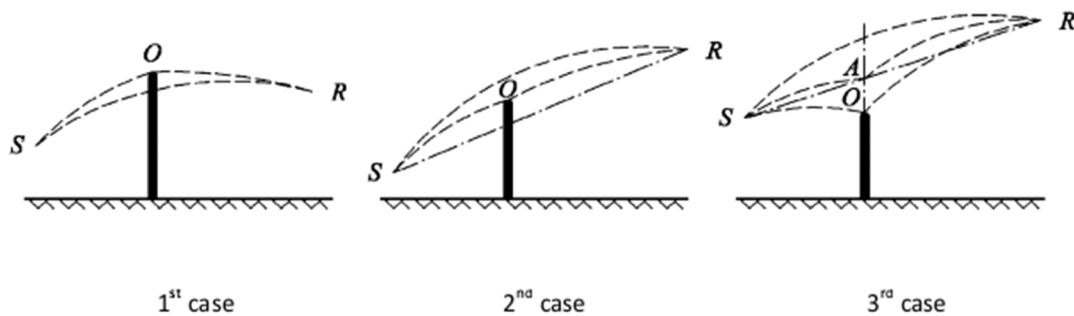


Fig. 3. 10

Cálculo de la diferencia de trayectoria en condiciones favorables (difracción simple).

En condiciones favorables, se considera que los tres rayos sonoros curvos SO, OR y SR tienen un radio idéntico de curvatura  $\Gamma$  definido por:

$$\Gamma = \max(1000, 8d)$$

La longitud de un rayo sonoro curvo MN se denota  $\overline{MN}$  en condiciones favorables. Esta longitud es igual a:

$$\hat{MN} = 2\Gamma \arcsin\left(\frac{MN}{2\Gamma}\right)$$

Ecuación 3. 26

En principio, tres escenarios deben de ser considerados en el cálculo de la diferencia de trayectorias en condiciones favorables  $\delta_F$  (ver Imagen 3.10). En la práctica, son suficientes dos ecuaciones:

- Si el rayo recto del sonido SR está enmascarado por el obstáculo (Primero y segundo caso en la Imagen 3.10).

$$\delta_F = \hat{SO} + \hat{OR} - \hat{SR}$$

Ecuación 3. 27

- Si el rayo recto del sonido SR no está enmascarado por el obstáculo (Tercer caso en la Imagen 3.10).

$$\delta_F = 2\hat{SA} + 2\hat{AR} - \hat{SO} - \hat{OR} - \hat{SR}$$

Ecuación 3. 28

donde A es la intersección del rayo recto del sonido SR y la extensión de la difracción obstáculo.

Para las difracciones múltiples en condiciones favorables:

- determinar el convex hull definido por los diferentes bordes de difracción diferentes;
- eliminar los puntos de difracción que no están en el límite del convex hull;
- calcular  $\delta_F$  basado en las longitudes de los rayos curvos de sonido, por romper el camino difractada en tantos segmentos curvos como sea necesario (Imagen 3.11).

$$\delta_F = S\hat{O}_1 + \sum_{i=1}^{n-1} O_i\hat{O}_{i+1} + \hat{O}_n R - \hat{SR}$$

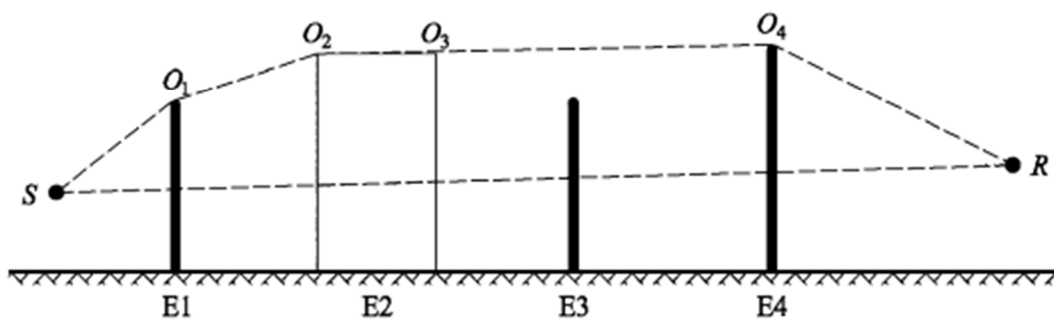


Fig. 3. 11

Ejemplo de cálculo de la diferencia de camino en condiciones favorables, en el caso de múltiples difracciones

En el escenario que se presenta en la Figura 3.11, la diferencia de camino es:

$$\delta_F = S\hat{O}_1 + O_1\hat{O}_2 + O_2\hat{O}_3 + O_3\hat{O}_4 + \hat{O}_4 R - \hat{SR}$$

Ecuación 3. 29

### 3.3.4.4. Cálculo de la atenuación $A_{dif}$

La atenuación debida a la difracción, teniendo en cuenta los efectos de tierra en el lado de la fuente y el lado receptor en cuenta, se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones generales:

$$A_{dif} = \Delta_{dif}(S,R) + \Delta_{ground}(S,O) + \Delta_{ground}(O,R)$$

Ecuación 3. 30

donde

- $\Delta_{dif}(S, R)$  es la atenuación debida a la difracción entre la fuente S y el receptor R;
- $\Delta_{ground}(S, O)$  es la atenuación debida al efecto del suelo en el lado de la fuente, ponderado por la difracción en el lado de la fuente (ver apartado 3.3.4.4.1).
- $\Delta_{ground}(O, R)$  es la atenuación debida al efecto suelo en el lado receptor, ponderado por la difracción en el lado del receptor (véase la subsección 3.3.4.4.2).

#### 3.3.4.4.1. Cálculo del término $\Delta_{ground}(s,o)$

$$\Delta_{ground}(S,O) = -20 \times \lg \left( 1 + \left( 10^{\frac{-A_{ground}(S,O)}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{dif}(S,R) - \Delta_{dif}(S,R))}{20}} \right)$$

Ecuación 3. 31

donde

- $A_{ground}(S, S)$  es la atenuación debida al efecto de tierra entre la fuente S y el punto de difracción O. Este término se calcula como se indica en la subsección 3.3.3.3 en condiciones homogéneas y en la subsección 3.3.3.4 en condiciones favorables, con las siguientes hipótesis:
  - $Z_r = Z_{o,s}$
  - $G_{path}$  se calcula entre S y O;
  - En condiciones homogéneas:  $G_w = G'_{path}$  en la ecuación 3.17,  $G_m = G'_{path}$  en la ecuación 3.18.
  - En condiciones favorables:  $G_m = G_{path}$  en la ecuación 3.17,  $G_m = G'_{path}$  en la ecuación (3.20);
  - $\Delta_{dif}(S', R)$  es la atenuación debida a la difracción entre la imagen de la fuente S' y R, calculado como en la subsección 3.3.4.2
  - $\Delta_{dif}(S, R)$  es la atenuación debida a la difracción entre S y R, calculado como en subsección 3.3.4.2.

#### 3.3.4.4.2. Cálculo del término $\Delta_{ground}(o,r)$

$$\Delta_{ground}(O,R) = -20 \times \lg \left( 1 + \left( 10^{\frac{-A_{ground}(O,R)}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{dif}(S,R') - \Delta_{dif}(S,R))}{20}} \right)$$

Ecuación 3. 32

donde

- $A_{ground}(O, R)$  es la atenuación debida al efecto de tierra entre el punto de difracción O y el receptor R. Este término se calcula para condiciones homogéneas como se indica en

la subsección 3.3.3.3 y en la subsección 3.3.3.4 para condiciones favorables, aceptando las siguientes hipótesis:

- $Z_s = Z_{O, r}$
- $G_{path}$  se calcula entre O y R.

La corrección  $G'_{path}$  no tiene que tenerse en cuenta aquí ya que la fuente es considerada como un punto de difracción. Por lo tanto,  $G_{path}$  se debe utilizar en el cálculo de los efectos de tierra, incluyendo, el término de límite inferior de la ecuación que se convierte  $-3(1 - G_{path})$ .

- En condiciones homogéneas,  $G_w$  en la Ecuación 3.17 (y  $G_m$  en la Ecuación 3.18) es igual a  $G_{path}$ ;
- En condiciones favorables,  $G_w$  en la Ecuación 3.17 (y  $G_m$  en la Ecuación 3.20) es igual a  $G_{path}$ ;
- $\Delta_{dif}(S, R')$  es la atenuación debida a la difracción entre S y la imagen del receptor R', calculado como en el apartado 3.3.4.2.
- $\Delta_{dif}(S, R)$  es la atenuación debida a la difracción entre S y R, calculado como en el apartado 3.3.4.2.

### 3.3.4.5. Escenarios de bordes verticales.

La ecuación 3.22 se puede utilizar para calcular las difracciones en los bordes verticales (difracciones laterales). Si este es el caso,  $A_{dif} = A_{dif}(S, R)$  se toma y la  $A_{ground}$  se mantiene. Además, la  $A_{ATM}$  y  $A_{ground}$  se calcula a partir de la longitud total de la trayectoria de propagación.  $A_{div}$  se calcula a partir de la directa distancia d. A raíz de esto las ecuaciones 3.8 y 3.6, respectivamente, se convierten en:

$$A_H = A_{div} + A_{atm}^{path} + A_{ground,H}^{path} + \Delta_{dif,H}(S,R)$$

$$A_F = A_{div} + A_{atm}^{path} + A_{ground,F}^{path} + \Delta_{dif,H}(S,R)$$

Ecuación 3. 33 Ecuación 3. 34

$\Delta_{dif}$  se utiliza en condiciones homogéneas en la ecuación de 3.33.

### 3.3.5. REFLEXIONES SOBRE LOS OBSTÁCULOS VERTICALES

#### 3.3.5.1. Atenuación a través de la absorción

Las reflexiones sobre los obstáculos verticales se tratan por medio de imágenes de fuentes. Las reflexiones sobre fachadas de los edificios y barreras acústicas se tratan de esta manera.

Un obstáculo se considera que es vertical si su pendiente en relación con la vertical es inferior a 15°.

Cuando se trata de reflexiones sobre los obstáculos significativamente inclinadas, el método debe ser aplicado en 3D.

Los obstáculos en donde al menos una dimensión es inferior a 0,5 m deben ser ignorados en cálculo de la reflexión, excepto para las configuraciones especiales.

Tenga en cuenta que las reflexiones sobre el terreno no se tratan aquí. Se tienen en cuenta en los cálculos de atenuación debido a la frontera (suelo, la difracción).

Si  $L_W$  es el nivel de potencia de la fuente  $S$  y  $\alpha_r$  el coeficiente de absorción de la superficie del obstáculo, entonces el nivel de potencia de "la fuente de imagen  $S'$ " es igual a:

$$L_{W'} = L_W + 10 \times \lg(1 - \alpha_r)$$

Ecuación 3. 35

donde  $0 \leq \alpha_r < 1$

Las atenuaciones de propagación descritas anteriormente (véanse las secciones 3.3.1 y 3.3.4) se aplican a esta trayectoria (imagen de la fuente, receptor), y para una trayectoria directa.

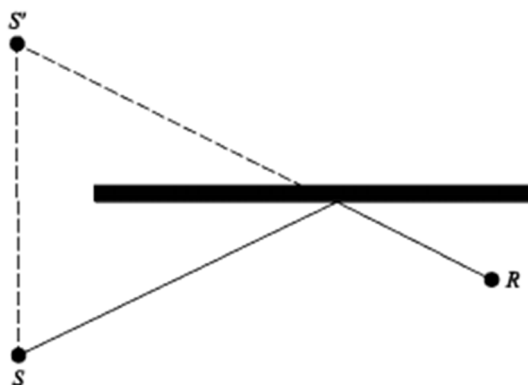


Fig. 3. 12

Reflexión especular sobre un obstáculo tratada por el método de imagen de la fuente (S: fuente,  $S'$ : Imagen fuente, R: receptor)

### 3.3.5.2. Atenuación a través de retro difracción.

En la investigación geométrica de trayectos del sonido, en la reflexión sobre un obstáculo vertical (barrera, edificio), la posición del impacto del rayo en relación con el borde superior de este obstáculo determina la proporción más o menos importante de energía reflejada eficazmente.

Esta pérdida de energía acústica cuando el rayo se somete a una reflexión es llamada la atenuación a través de retro difracción.

En el caso de reflexiones múltiples entre dos paredes verticales, sino se tiene en cuenta la retro difracción se sobreestiman los resultados del nivel sonoro, esta sobreestimación aumenta con el orden de reflexiones.

En el caso de una zanja (véase por ejemplo la Imagen 3.13), la atenuación a través de retro difracción se debe aplicar a cada reflexión sobre los muros de contención.

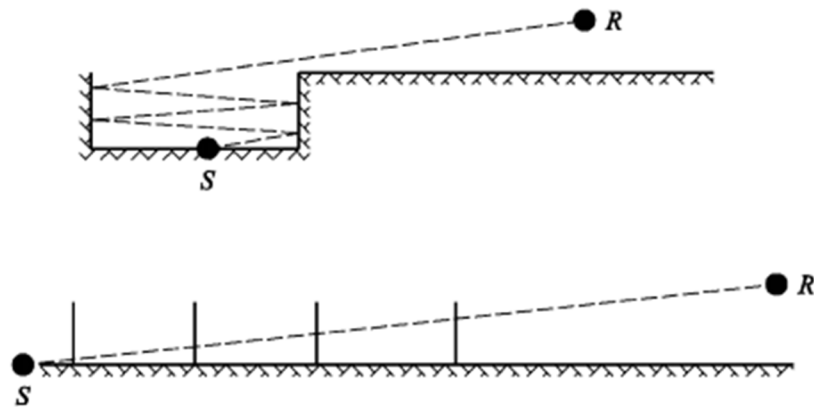
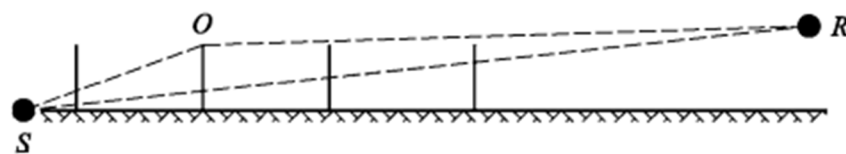


Fig. 3. 13

Reflexión del rayo sonoro de orden de 4 en una zanja: sección transversal real (arriba), se sección transversal desarrollada (inferior).

En esta representación, el rayo sonoro llega al receptor pasando sucesivamente por los muros de contención de la zanja, que por lo tanto se pueden comparar con aberturas. En el cálculo de la propagación a través de una abertura, el campo de sonido en el receptor es la suma del campo directo y el campo difractado por los bordes de la abertura. Este campo difractado asegura la continuidad de la transición entre la zona clara y la zona de sombra. Cuando el rayo se aproxima al borde de la abertura, el campo directo es atenuado. El cálculo es idéntico al de la atenuación por una barrera en la zona clara. La diferencia de camino  $\delta'$  asociado con cada retro difracción es lo contrario de la diferencia de camino entre S y R relativamente en cada borde superior O, (véase la imagen 3.14).

$$\delta' = -(SO + OR - SR)$$



Ecuación 3. 36 Fig. 3. 14

La diferencia de camino para la segunda reflexión

El signo "menos" de la ecuación 3.35 significa que el receptor se considera que está en la zona clara.

La atenuación a través de la retro difracción  $A_{\text{retrodif}}$  se obtiene por la ecuación 3.36, que es similar a la ecuación 3.22 con algunas adaptaciones.

$$\Delta_{retrodif} = \begin{cases} 10C_h \cdot \lg\left(3 + \frac{40}{\lambda} \delta'\right) & \text{if } \frac{40}{\lambda} \delta' \geq -2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ecuación 3. 37

Esta atenuación se aplica al rayo directo cada vez que 'pasa a través' (refleja en) una pared o edificio. El nivel de potencia de "la fuente de imagen S se convierte así :

$$L_{W'} = L_W + 10 \times \lg(1 - \alpha_r) - \Delta_{retrodif}$$

Ecuación 3. 38

En las configuraciones de propagación compleja, la difracción puede existir entre las reflexiones, o entre el receptor y las reflexiones. En este caso, la retro difracción de las paredes se estima teniendo en cuenta la ruta entre el origen y el primer punto de difracción R '(por lo tanto, se debe considerar como el receptor en la ecuación 3.35. Este principio se ilustra en la imagen 3.15.

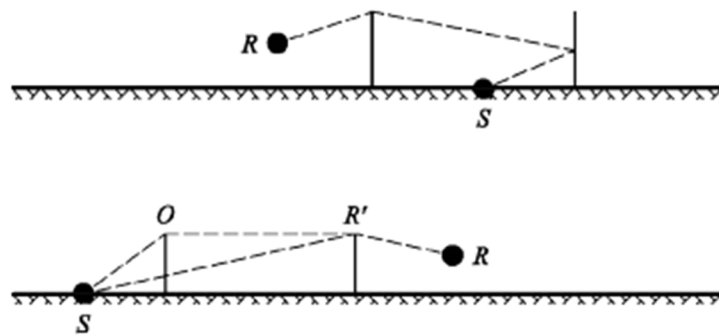


Fig. 3. 15

La diferencia de camino en la presencia de una difracción: sección transversal real (parte superior), sección desarrollada cruzada (abajo)



## 4. CALCULO TEORICO

### 4.1. Cálculo teórico de los valores “Rolling noise” y “Propulsion noise” para un determinado vehículo

Mediante estos valores obtendremos los niveles de potencia sonora que genera un vehículo en tráfico rodado. Las fórmulas a emplear para el cálculo de ambos parámetros son las siguientes:

#### 4.1.1. ROLLING NOISE:

$$L_{WR,j,m} = A_{R,i,m} + B_{R,j,m} \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,j,m}(v_m)$$

Ecuación 4. 1

$$\Delta L_{WR,j,m}(v_m) = \Delta L_{WR,road,j,m}(v_m) + \Delta L_{studded\ tyres,j,m=1}(v_m) + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp}(\tau)$$

Ecuación 4. 2

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right)$$

Ecuación 4. 3

Donde,

- $A_R$  y  $B_R$  son coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos.
- $v$  es la velocidad del vehículo en km/h.
- $v_{ref}$  es la velocidad de referencia (70 km/h).
- $\Delta L_{WR,road}$  es la corrección relacionada con el tipo de calzada.
- $\alpha_{i,m}$  y  $\beta_m$  son coeficientes para la corrección del tipo de calzada.
- $\Delta L_{studded\ tyres}$  será despreciada, en esta primera aproximación.
- $\Delta L_{WR,acc}$  Será despreciada, en esta primera aproximación.
- $\Delta L_{W,temp}$  será despreciada, en esta primera aproximación.

El resultado se expresará en dB, con referencia 1 pW. Se expresarán para cada banda de tercio de octava, desde 25 Hz hasta 10 kHz.

#### 4.1.2. PROPULSION NOISE:

$$L_{WP,j,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,j,m}(v_m)$$

Ecuación 4. 4

$$\Delta L_{WP,j,m}(v_m) = \Delta L_{WP,road,i,m}(v_m) + \Delta L_{WP,acc,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m}(v_m)$$

Ecuación 4. 5

$$\Delta L_{WP,road} = \text{Max}\{\alpha_{i,m}; 0\}$$

Ecuación 4. 6

Donde,

- $A_p$  y  $B_p$  son coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos.
- $v$  es la velocidad del vehículo.
- $v_{ref}$  es la velocidad de referencia (70 km/h).
- $\Delta L_{WP,road}$  es la corrección relacionada con el tipo de calzada.
- $\alpha_{i,m}$  son coeficientes para la corrección del tipo de calzada.
- $\Delta L_{WP,acc,i,m}$  será despreciada, en esta primera aproximación.
- $\Delta L_{WP,grad,i,m}$  será despreciada, en esta primera aproximación.

Estos valores quedarán definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad.

La expresión, una vez ponderadas todas las bandas, será en dBA.

## 4.2. Potencia instantánea de la fuente, $L_{W,0}$

Haciendo la suma logarítmica de ambos valores obtendremos la potencia instantánea de la fuente. En este caso la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \times \lg \left( 10^{L_{WR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10} \right)$$

Ecuación 4. 7

Donde,

- $L_{WR,i,m}$  y  $L_{WP,i,m}$  son los valores de rolling y propulsion calculados anteriormente.

Estos valores quedarán definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad.

La expresión, una vez ponderadas todas las bandas, será en dBA.

Para vehículos de categoría 4 este apartado no será de aplicación, ya que la única fuente considerada es la superior (propulsión).

## 4.3. Potencia media por unidad de longitud, $L_{W',eq,line}$

El paso siguiente será evaluar la potencia lineal de una vía en función de la intensidad del tráfico.

La potencia media por unidad de longitud viene expresada en dB/m (ref.  $10^{-12}$  w/m).

En este caso, además de todas las variables anteriores, habrá que tener en cuenta el periodo de medida (T, en segundos) y el número de vehículos en dicho periodo (N).

La fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

Ecuación 4. 8

Donde,

- $L_{W,0}$  es el nivel de potencia sonora instantánea de la fuente (un vehículo) obtenido anteriormente.
- T es el periodo de medida en segundos.
- N es el número de vehículos en el periodo de medida.
- V es la velocidad media del tráfico, en m/s.

Estos valores quedarán definidos para las tres variables anteriores (tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad) y también para T y N (periodo de medida y vehículos en el periodo, respectivamente).

#### 4.4. Predicción del Nivel de Presión Sonora en el receptor, $L_{Aeq}$

El parámetro que se predice es el nivel  $L_{Aeq}$  en dBA. En este apartado habrá que tener en cuenta la distancia de medida (h, en metros).

La fórmula a emplear es la siguiente:

$$NPS = L_{W',eq,line} - 3 - 10 \cdot \log h$$

Ecuación 4. 9

Donde,

- $L_{W',eq,line}$  es el nivel de potencia sonora media por unidad de longitud calculado anteriormente.
- h es la distancia de la línea de tráfico al receptor, en metros.

Estos valores quedarán definidos para las cinco variables anteriores (tipo de vehículo, tipo de calzada, velocidad, periodo de medida y nº de vehículos) y también para h (distancia de medida). La reducción de 3 dB es debida a la consideración de suelo reflectante. La reducción por distancia es debida a la atenuación por divergencia para fuentes lineales.

## 5. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y CAMPAÑA DE MEDIDAS

A lo largo de este apartado, se detallará cuáles han sido las herramientas utilizadas para realizar este proyecto, además de sus características y su configuración. El proyecto se divide en dos partes claramente diferenciadas, la toma de medidas y su análisis.

### 1.1 Dispositivo experimental

#### 5.1.1. TOMA DE MEDIDAS

##### 5.1.1.1. Sonómetro

Las medidas se han tomado y registrado con el sonómetro Bruel & Kjaer 2260.

Cuyas características son:

- Nombre: Bruel & Kjaer 2260 Investigator
- N° de serie: 2027578
- Software: BZ7206 versión 1.1
- Ancho de banda: 1/3 Octava
- Rango: 19,6-99,6 dB
- Parámetros de medida:  $L_{eq}$ ,  $L_{max}$ ,  $L_{min}$ ,  $L_{peak}$ ,  $L_{T3}$ ,  $L_{T5}$ ,  $L_{NA}$ ,  $L_{AE}$ ,  $L_{EP}$ , d.
- Resolución de medida: 100 ms.
- Micrófono
  - N° de serie del micrófono: 2607643
  - Sensibilidad del micrófono:  $-25,6 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$  (Ref: 1 V/Pa)
  - Capacitancia del micrófono: 14 pF (at 250 Hz).

Cumple los siguientes standards:

- IEC 60651 (1979) plus Amendment 1 (1993-02) and Amendment 2 (200-10), Type 1
- IEC 60804 (2000-10) Type 1
- IEC 61672-1 (2002-05) Class 1
- DIN 45657 (1997-07)
- IEC 61260 (1995-07) plus Amendment 1 (2001-09), Octave and 1/3-octave Bands
- ANSI S1.4-1983 (R 1997) plus ANSI S1.4A-1985 Amendment
- ANSI S1.43-1997 Type 1
- ANSI S1.11-1986 (R 1993), Octave and 1/3-octave Bands, Order 3, Type 0-C, Optional Range.

##### 5.1.1.2. Calibrador sonoro

Calibrador acústico Brüel & Kjær 4230

- N° de serie 1380268.
- Pistofono de frecuencia 1 KHz, nivel de presión sonora de 94 dB.

#### **5.1.1.3. Trípode**

- Se ha utilizado un trípode para colocar el sonómetro según las especificaciones de CNOSSOS.

### **5.1.2. ANÁLISIS**

#### **5.1.1.4. Software**

El software es Noise Explorer Type 7815 Versión 4.5 Brüel & Kjaer, se ha utilizado para importar las medidas desde el sonómetro y acotar las medidas individuales.

También se ha utilizado el procesador de hojas de cálculo Excel, para procesar los datos.

## 5.2. Campaña de medidas

En este apartado se muestra cómo se han realizado las medidas, donde se han realizado y que proceso se ha hecho a posteriori con esas medidas.

Todas las medidas se han realizado en función de las especificaciones del método CNOSSOS , de manera que se pueda calcular la efectividad de este método aplicado sobre vías urbanas comparándolo con medidas de campo reales.

### 5.2.1. LUGARES DE MEDICIÓN

Las medidas se han realizado casi en su totalidad en dos municipios de la Comunidad Foral de Navarra, Barañain y Cizur Mayor. Además se han incluido varias medidas en la N-121 para reforzar la aforación de vehículos pesados, ya que por núcleos urbanos apenas se apreciaban. En total son 44 medidas.

Las primeras 24 medidas se realizaron en el municipio de Barañain.

A continuación se muestran dos mapas, el primero muestra la localización del municipio y el segundo los 24 puntos de medida.

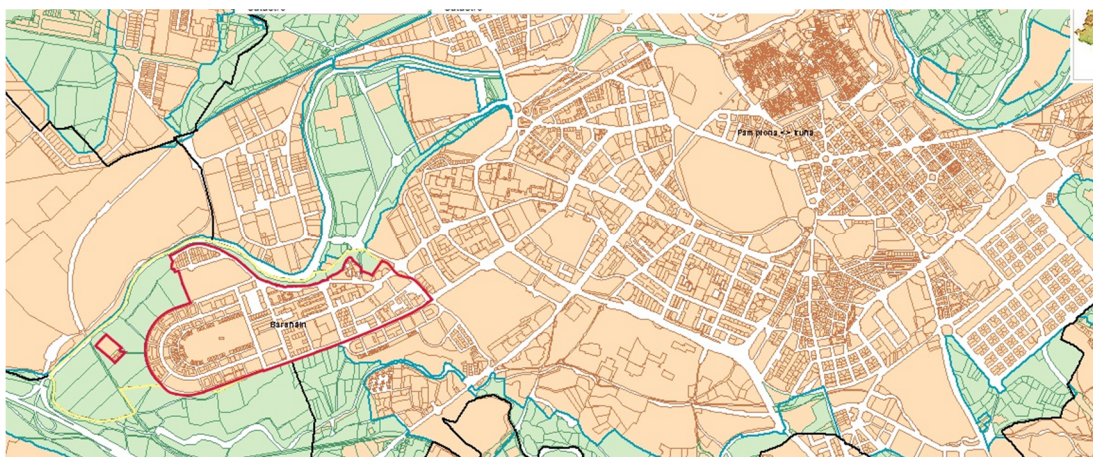


Fig. 5. 1





Fig. 5. 2

La otra fase de medición se realizó en Cizur Mayor y la componen un total de 15 medidas. Cabe destacar que tanto en Barañáin como en Cizur Mayor, se descartaron algunas calles, dado su bajo tráfico.

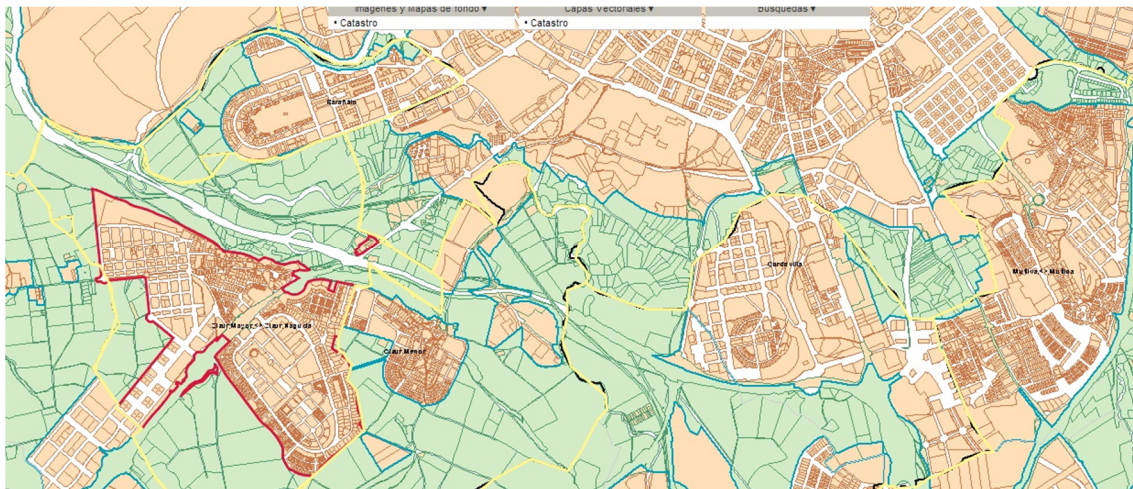


Fig. 5. 3





**Fig. 5. 4**



### 5.2.2. PREPARACIÓN

Una vez elegida la vía sobre la que realizar la medición se deben de tener en cuenta los siguientes aspectos.

- Elegir un punto concreto donde colocar el sonómetro separado de la vía lo suficiente para no suponer un obstáculo a los vehículos y apartado de cualquier obstáculo alrededor para que no se produzca el efecto del apantallamiento.
- Colocar el sonómetro con ayuda del trípode a 1,5 metros sobre el suelo.
- Configurar el sonómetro de la siguiente manera:
  - Tiempo de medida: 10 minutos
  - Capturar datos cada segundo
  - Ancho de banda: tercios de octava
  - Parámetros: LAeq
  - Formato de archivo: .S3D

De este modo registraremos medidas de 10 minutos en cada vía, con una captura de datos cada segundo. En estos diez minutos registraremos los pasos de vehículo, especificando el tipo de vehículo según su categoría, la velocidad, el carril distinguiendo entre cercano y lejano y el tiempo de paso para poder localizarlo a posteriori. Para esto hemos utilizado esta plantilla.

Medición	TIPO VEHÍCULO						Velocidad (Km/h)	Minuto paso	CARRIL		Observaciones
	Automóvil	Furgoneta	Cam. Peq	Cam. Gran	Villavesa	Moto			Cercano	Lejano	
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											

Fig. 5. 5

### 5.2.3. ANÁLISIS DE MEDIDAS

Una vez registradas las medidas se descargan en el laboratorio en un ordenador, conectando el sonómetro a este.

Con el software Noise Explorer Type 7815 podemos visualizar varias gráficas que corresponden con nuestros 10 minutos de medida.

La que nos interesa es la siguiente.

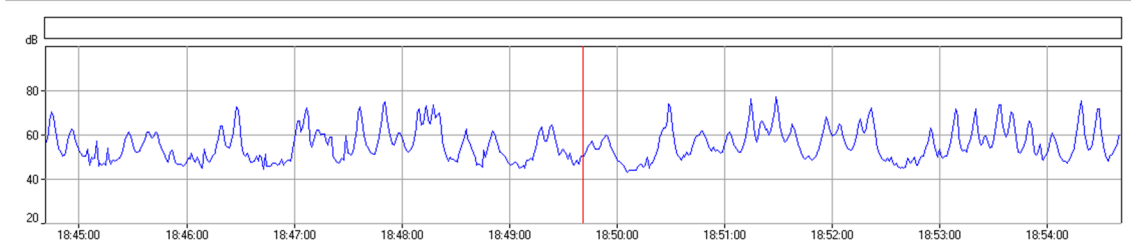


Fig. 5.6

En esta gráfica se trata de localizar según lo registrado en la plantilla de pasos, los pasos de los distintos vehículos. Los pasos tienen que ser válidos, es decir tienen que estar aislados de otros pasos, de modo que el ruido de un vehículo no interfiera en el paso de otro vehículo. En la siguiente imagen se distingue un paso válido de uno no válido.

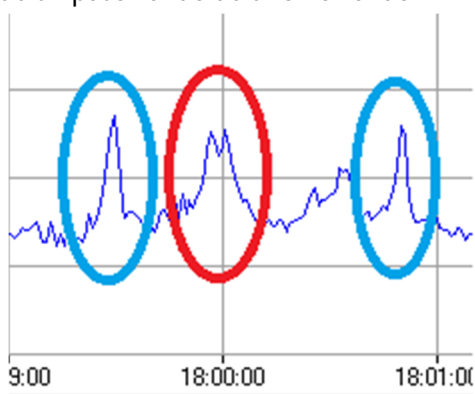


Fig. 5.7

En rojo un paso no válido, se aprecian dos picos superpuestos, lo que indica que se han cruzado dos vehículos.

En azul dos pasos válidos, los picos están correctamente aislados.

Una vez aislado el paso tenemos que llegar a un dato concreto, el **LAeq**, que se corresponde con el índice acústico que aporta CNOSSOS y con el cual compararemos nuestra medida.

LAeq es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, en decibelios, determinado sobre un intervalo temporal de T segundos. Se emplea para evaluar niveles sonoros en un intervalo temporal T. en un punto del espacio.

La **ponderación A** es un método de ajustar las mediciones para que coincidan con la sensibilidad del oído humano en sus diferentes frecuencias.

A continuación se muestra mediante un ejemplo el proceso seguido con cada paso.

Seleccionamos el paso, recordemos que debe estar registrado en la plantilla y que debe ser válido.

La siguiente imagen corresponde al pico generado por el paso de un vehículo ligero en la calle Avenida de la Cultura de Barañain, el día 29/02/2012 a las 11:33 de la mañana y una distancia entre el centro del carril y del sonómetro de 3,5 metros. La velocidad del vehículo es de 30 km/h y el tiempo de medida es de 18 segundos.

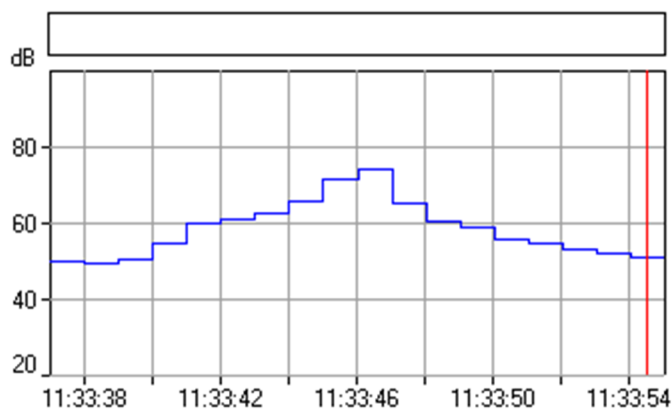


Fig. 5. 8

Una vez aislado el paso se exportan los datos a una hoja Excel, para poder operar sobre cifras. Los datos que tenemos son el LAeq total cada segundo y LAeq de cada tercio de octava de 25 Hz hasta 10 KHz, pero sin tener en cuenta el tiempo de paso ni la ponderación A.

Start time	LAeq	LLeq 25Hz	LLeq 31,5Hz	LLeq 40Hz	LLeq 50Hz	LLeq 63Hz
11:33:38	49,2	57,15	58,14	59,34	63,19	52,5
11:33:39	50,1	52,73	60,19	61,2	62,06	50,36
11:33:40	54,25	57,4	56,36	55,9	64,81	49,82
11:33:41	59,5	55,4	55,74	51,19	57,94	55,18
11:33:42	60,55	57,89	60,95	55,46	56,54	52,87
11:33:43	62,27	59,65	57,81	61,09	61,21	50,97
11:33:44	65,41	56,49	55,43	57,07	66,53	51,17
11:33:45	71,01	51,8	57,99	58,8	74,49	56,62
11:33:46	74	64,74	63,72	68,35	78,54	65
11:33:47	64,79	56,91	59,18	62,93	69,13	54,18
11:33:48	60,3	57,44	60,59	57,82	66,25	52,02
11:33:49	58,52	54,74	56,1	53,38	62,62	57,41
11:33:50	55,52	57,77	58,15	56,5	61,37	57,03
11:33:51	54,2	52,2	63,49	60,43	59,46	54,91
11:33:52	52,98	54,59	63,15	58,2	62,86	57,66
11:33:53	51,68	57,26	61,3	58,08	61,34	57,05
11:33:54	50,51	55,5	60,52	60	63,37	54,75
11:33:55	54,16	56,79	60,85	63,96	57,84	50,6

Tabla 5. 1

Para tener el dato final teniendo en cuenta el tiempo de paso y la ponderación A se hacen los siguientes cálculos:

Se calcula la energía total de la medida, calculando el sumatorio de la energía para cada valor muestreado cada segundo mediante la fórmula:

$$\sum_{1}^n 10^{\frac{LA_{eq}(n)}{10}}$$

Ecuación 5. 1

Start time	Energía	Energía 25Hz	Energía 31,5Hz	Energía 40Hz	Energía 50Hz	Energía 63Hz
11:33:38	83176,3771	518800,0389	651628,3941	859013,5215	2084490,883	177827,941
11:33:39	102329,299	187499,4508	1044720,219	1318256,739	1606941,253	108642,5624
11:33:40	266072,506	549540,8739	432513,831	389045,145	3026913,428	95940,06315
11:33:41	891250,938	346736,8505	374973,0022	131522,4832	622300,2852	329609,7122
11:33:42	1135010,82	615176,8727	1244514,612	351560,4405	450816,7045	193642,1964
11:33:43	1686553,03	922571,4272	603948,6294	1285286,66	1321295,634	125025,903
11:33:44	3475361,61	445656,2484	349140,3155	509330,8711	4497798,549	130918,1923
11:33:45	12618275,3	151356,1248	629506,1829	758577,575	28119008,3	459198,0128
11:33:46	25118864,3	2978516,429	2355049,284	6839116,473	71449632,61	3162277,66
11:33:47	3013006,02	490907,8762	827942,1637	1963360,277	8184647,881	261818,3008
11:33:48	1071519,31	554625,713	1145512,941	605340,8748	4216965,034	159220,8727
11:33:49	711213,514	297851,6429	407380,2778	217770,9772	1828100,216	550807,6964
11:33:50	356451,133	598411,5951	653130,5526	446683,5922	1370881,766	504661,2976
11:33:51	263026,799	165958,6907	2233572,223	1104078,62	883079,9004	309741,9299
11:33:52	198609,492	287739,8415	2065380,156	660693,448	1931968,317	583445,1043
11:33:53	147231,25	532108,2593	1348962,883	642687,7173	1361444,682	506990,7083
11:33:54	112460,497	354813,3892	1127197,456	1000000	2172701,179	298538,2619
11:33:55	260615,355	477529,2737	1216186,001	2488857,318	608135,0013	114815,3621
ΣEnergía	51511027,6	10475800,6	18711259,12	21571182,73	135737121,6	8073121,777

Tabla 5. 2

El cálculo del  $L_{Aeq}$  se realiza mediante la siguiente ecuación, para aplicarle la ponderación se le suman los coeficientes de la ponderación A.

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \log \left( \frac{N}{M} \times \text{Energía} \right)$$

Ecuación 5. 2

Donde:

- N es el número de vehículos registrados a lo largo del tiempo de medida, en nuestro caso será siempre 1.
- M es el número de muestras registradas a lo largo del tiempo de medida, como cogemos una muestra cada segundo, en este caso serán 18 segundos.
- Energía es el valor calculado anteriormente.

	Total	25Hz	31,5Hz	40Hz	50Hz	63Hz
ΣEnergía	51511027,6	10475800,6	18711259,12	21571182,73	135737121,6	8073121,777
Leq	64,5662771	57,64914718	60,16830508	60,78601453	68,7742613	56,51768998
	POND. A	-44,7	-39,4	-34,6	-30,2	-26,2
<b>L<sub>aeq</sub></b>	<b>64,6</b>	<b>12,9</b>	<b>20,8</b>	<b>26,2</b>	<b>38,6</b>	<b>30,3</b>

Tabla 5. 3

El resultado final es de 64,6 dBA.

## 5.2.4. CÁLCULO DEL VALOR TEÓRICO PREDICHO POR CNOSSOS.

En este apartado se trata de (mediante un modelo predicho por CNOSSOS) calcular el LAeq que genera un vehículo pasando por un vía, a una velocidad y a una distancia al sonómetro concretas.

En este cálculo simularemos que la vía se corresponde con un tipo de pavimento TBC. Intervienen varios coeficientes, detallaremos solo los que utilizamos para este ejemplo concreto, un vehículo ligero a una distancia entre el centro del carril y del sonómetro de 3,5 metros, la velocidad del vehículo es de 30 km/h y el tiempo de medida es de 18 segundos.

El primer paso es calcular el Rolling Noise, descrito en el apartado cuyas fórmulas son las siguientes:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,i,m}(v_m)$$

Ecuación 5. 3

$$\Delta L_{WR,i,m}(v_m) = \Delta L_{WR,road,i,m}(v_m) + \Delta L_{studded\,tyres,i,m=1}(v_m) + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp}(\tau)$$

Ecuación 5. 4

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right)$$

Ecuación 5. 5

En la primera fórmula son necesarios  $A_{R,i,m}$  y  $B_{R,i,m}$  que son coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos en tráfico rodado. Dados por la tabla:

1/3 octave band center freq. (Hz)	$A_R$	$B_R$	$A_P$	$B_P$	$C_P$
25	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
31.5	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
40	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
50	74.9	30.0	87.9	0.0	7.0
63	74.9	30.0	90.8	-3.0	7.0
80	74.9	30.0	89.9	0.0	7.0
100	79.3	41.0	86.9	8.0	7.0
125	82.0	41.2	82.6	6.0	7.0
160	81.2	42.3	81.9	6.0	7.0
200	80.9	41.8	82.3	7.0	7.0
250	78.9	38.6	83.9	8.0	4.0
315	78.8	35.5	83.3	8.0	4.0
400	80.5	32.9	82.4	8.0	4.0
500	85.0	25.0	80.6	8.0	4.0
630	87.9	25.0	80.2	8.0	4.0
800	90.9	27.0	77.8	8.0	4.0
1000	93.3	33.4	78.0	8.0	4.0
1250	92.8	36.7	81.4	8.0	4.0
1600	91.5	37.0	82.3	8.0	4.0
2000	88.5	37.5	82.6	8.0	4.0
2500	84.9	37.5	81.5	8.0	4.0
3150	81.8	38.6	80.2	8.0	4.0
4000	78.7	39.6	78.5	8.0	4.0
5000	74.9	40.0	75.6	8.0	4.0
6300	71.8	39.9	73.3	8.0	4.0
8000	69.1	40.2	71.0	8.0	4.0
10000	65.6	40.3	68.1	8.0	4.0

Tabla 5. 4

En la tercera fórmula son necesarios los coeficientes  $\alpha_{i,m}$  y  $\beta_{i,m}$  correspondientes a la corrección para el efecto del tipo de calzada.

category 1		transversely brushed concrete	concrete with surface dressing 2/4	exposed aggregate concrete	PA <sup>(1)</sup> 6/16	2-layer PA <sup>(1)</sup> 4/8- 11/16	SMA <sup>(2)</sup> 0/6	surface dressing 4/8
$\alpha_{i,1}$	50 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	63 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	100 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	125 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	160 Hz	0.9	0.7	0.3	0.0	-0.5	0.0	1.7
	200 Hz	1.7	1.4	0.7	0.0	-1.1	0.0	3.4
	250 Hz	2.6	2.1	1.0	0.0	-1.6	0.0	5.1
	315 Hz	2.5	2.4	1.1	0.0	-2.2	0.0	5.3
	400 Hz	2.5	2.7	1.1	0.0	-2.7	0.0	5.4
	500 Hz	2.4	3.0	1.2	0.0	-3.3	0.0	5.6
	630 Hz	2.0	3.2	1.4	-0.4	-3.6	-0.7	5.3
	800 Hz	1.6	3.3	1.7	-0.7	-4.0	-1.3	4.9
	1 kHz	1.2	3.5	1.9	-1.1	-4.3	-2.0	4.6
	1.25 kHz	1.6	2.4	1.5	-2.2	-5.2	-2.3	2.6
	1.6 kHz	2.0	1.2	1.2	-3.4	-6.0	-2.6	0.5
	2 kHz	2.4	0.1	0.8	-4.5	-6.9	-2.9	-1.5
	2.5 kHz	1.6	-0.2	0.5	-4.8	-6.8	-2.7	-1.8
	3.15 kHz	0.8	-0.5	0.3	-5.0	-6.8	-2.4	-2.2
	4 kHz	0.0	-0.8	0.0	-5.3	-6.7	-2.2	-2.5
	5 kHz	0.0	-0.5	0.0	-3.5	-4.5	-1.5	-1.7
	6.3 kHz	0.0	-0.3	0.0	-1.8	-2.2	-0.7	-0.8
	8 kHz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10 kHz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
speed index ( $\beta_1$ )		6.0	-5.0	0.0	-11.0	-6.0	-5.0	-4.0
A-weighted correction at 70 km/h		1.4	2.7	1.3	-1.4	-4.6	-1.7	3.4

Tabla 5. 5



Conociendo los datos y sustituyendo en la fórmula ya podemos calcular el Rolling Noise, la  $v_{ref}$  es de 70 km/h.

Frec(Hz)	$A_R$	$B_R$	$\text{Max}\{\alpha_{imp}; 0\}$	$\beta_m$	$L_{WR}$	$\Delta L_{WR,road}$	$L_{WR}$
25,0	69,9	33,0	0,0	6,0	57,756766	-2,207861	55,5
31,5	69,9	33,0	0,0	6,0	57,756766	-2,207861	55,5
40,0	69,9	33,0	0,0	6,0	57,756766	-2,207861	55,5
50,0	74,9	30,0	0,0	6,0	63,860696	-2,207861	61,7
63,0	74,9	30,0	0,0	6,0	63,860696	-2,207861	61,7
80,0	74,9	30,0	0,0	6,0	63,860696	-2,207861	61,7
100,0	79,3	41,0	0,0	6,0	64,212952	-2,207861	62,0
125,0	82,0	41,2	0,0	6,0	66,839356	-2,207861	64,6
160,0	81,2	42,3	0,9	6,0	65,634582	-1,307861	64,3
200,0	80,9	41,8	1,7	6,0	65,51857	-0,507861	65,0
250,0	78,9	38,6	2,6	6,0	64,696096	0,3921393	65,1
315,0	78,8	35,5	2,5	6,0	65,736824	0,2921393	66,0
400,0	80,5	32,9	2,5	6,0	68,393564	0,2921393	68,7
500,0	85,0	25,0	2,4	6,0	75,80058	0,1921393	76,0
630,0	87,9	25,0	2,0	6,0	78,70058	-0,207861	78,5
800,0	90,9	27,0	1,6	6,0	80,964627	-0,607861	80,4
1000,0	93,3	33,4	1,2	6,0	81,009575	-1,007861	80,0
1250,0	92,8	36,7	1,6	6,0	79,295252	-0,607861	78,7
1600,0	91,5	37,0	2,0	6,0	77,884859	-0,207861	77,7
2000,0	88,5	37,5	2,4	6,0	74,700871	0,1921393	74,9
2500,0	84,9	37,5	1,6	6,0	71,100871	-0,607861	70,5
3150,0	81,8	38,6	0,8	6,0	67,596096	-1,407861	66,2
4000,0	78,7	39,6	0,0	6,0	64,128119	-2,207861	61,9
5000,0	74,9	40,0	0,0	6,0	60,180929	-2,207861	58,0
6300,0	71,8	39,9	0,0	6,0	57,117726	-2,207861	54,9
8000,0	69,1	40,2	0,0	6,0	54,307333	-2,207861	52,1
10000,0	65,6	40,3	0,0	6,0	50,770536	-2,207861	48,6

Tabla 5. 6

El segundo paso es calcular el Propulsion Noise, cuyas fórmulas son:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m}(v_m)$$

Ecuación 5. 6

$$\Delta L_{WP,i,m}(v_m) = \Delta L_{WP,road,i,m}(v_m) + \Delta L_{WP,acc,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m}(v_m)$$

Ecuación 5. 7

$$\Delta L_{WP,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right)$$

Ecuación 5. 8

Nuevamente se consultan los coeficientes en las tablas anteriores y se sustituyen en las fórmulas:

Frec(Hz)	$A_p$	$B_p$	$\text{Max}\{\alpha_m, 0\}$	$L_{WP}$
25,0	87,0	0,0	0,0	87,0
31,5	87,0	0,0	0,0	87,0
40,0	87,0	0,0	0,0	87,0
50,0	87,9	0,0	0,0	87,9
63,0	90,8	-3,0	0,0	92,5
80,0	89,9	0,0	0,0	89,9
100,0	86,9	8,0	0,0	82,3
125,0	82,6	6,0	0,0	79,2
160,0	81,9	6,0	0,9	79,4
200,0	82,3	7,0	1,7	80,0
250,0	83,9	8,0	2,6	81,9
315,0	83,3	8,0	2,5	81,2
400,0	82,4	8,0	2,5	80,3
500,0	80,6	8,0	2,4	78,4
630,0	80,2	8,0	2,0	77,6
800,0	77,8	8,0	1,6	74,8
1000,0	78,0	8,0	1,2	74,6
1250,0	81,4	8,0	1,6	78,4
1600,0	82,3	8,0	2,0	79,7
2000,0	82,6	8,0	2,4	80,4
2500,0	81,5	8,0	1,6	78,5
3150,0	80,2	8,0	0,8	76,4
4000,0	78,5	8,0	0,0	73,9
5000,0	75,6	8,0	0,0	71,0
6300,0	73,3	8,0	0,0	68,7
8000,0	71,0	8,0	0,0	66,4
10000,0	68,1	8,0	0,0	63,5

Tabla 5. 7

Haciendo la suma logarítmica del valor del Rolling Noise y del Propulsion Noise obtendremos la potencia instantánea de la fuente  $L_{W,0}$ .



Frec(Hz)	LWR	LWP	LW,0
25,0	55,5	87,0	87,0
31,5	55,5	87,0	87,0
40,0	55,5	87,0	87,0
50,0	61,7	87,9	87,9
63,0	61,7	92,5	92,5
80,0	61,7	89,9	89,9
100,0	62,0	82,3	82,4
125,0	64,6	79,2	79,4
160,0	64,3	79,4	79,6
200,0	65,0	80,0	80,2
250,0	65,1	81,9	82,0
315,0	66,0	81,2	81,3
400,0	68,7	80,3	80,6
500,0	76,0	78,4	80,3
630,0	78,5	77,6	81,2
800,0	80,4	74,8	81,9
1000,0	80,0	74,6	81,9
1250,0	78,7	78,4	81,9
1600,0	77,7	79,7	81,9
2000,0	74,9	80,4	81,5
2500,0	70,5	78,5	79,3
3150,0	66,2	76,4	77,0
4000,0	61,9	73,9	74,4
5000,0	58,0	71,0	71,4
6300,0	54,9	68,7	69,0
8000,0	52,1	66,4	66,7
10000,0	48,6	63,5	63,8
			<b>98,4</b>

Tabla 5. 8

Ahora se evalúa la Potencia media por unidad de longitud,  $L_{W',eq,line}$  de la vía, en función de la intensidad del tráfico. Tal potencia media por unidad de longitud viene expresada en dB/m (ref. 10-12 w/m). En este caso, además de todas las variables anteriores, habrá que tener en cuenta el periodo de medida (T, en segundos) y el número de vehículos en dicho periodo (N).

En nuestro caso T= 18 segundos, N=1, y V=8,33 m/s.

La fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

Ecuación 5. 9

Después solo queda incorporar la supuesta distancia h entre el receptor y la línea de circulación. Utilizando esta fórmula:

$$NPS = L_{W',eq,line} - 3 - 10 \cdot \log h$$

Ecuación 5. 10

Se añade la ponderación A y ya se puede comparar con el dato real medido.

Frec(Hz)	LW,0	W,eq,lin	NPS	POND.A	ANPS
25,0	87,0	65,2	56,8	-44,7	12,1
31,5	87,0	65,2	56,8	-39,4	17,4
40,0	87,0	65,2	56,8	-34,6	22,2
50,0	87,9	66,2	57,7	-30,2	27,5
63,0	92,5	70,8	62,3	-26,2	36,1
80,0	89,9	68,1	59,7	-22,5	37,2
100,0	82,4	60,6	52,2	-19,1	33,1
125,0	79,4	57,7	49,2	-16,1	33,1
160,0	79,6	57,8	49,3	-13,4	35,9
200,0	80,2	58,4	50,0	-10,9	39,1
250,0	82,0	60,2	51,8	-8,6	43,2
315,0	81,3	59,6	51,1	-6,6	44,5
400,0	80,6	58,8	50,4	-4,8	45,6
500,0	80,3	58,6	50,1	-3,2	46,9
630,0	81,2	59,4	51,0	-1,9	49,1
800,0	81,9	60,1	51,7	-0,8	50,9
1000,0	81,9	60,1	51,7	0,0	51,7
1250,0	81,9	60,1	51,7	0,6	52,3
1600,0	81,9	60,2	51,7	1,0	52,7
2000,0	81,5	59,7	51,3	1,2	52,5
2500,0	79,3	57,5	49,0	1,3	50,3
3150,0	77,0	55,2	46,8	1,2	48,0
4000,0	74,4	52,6	44,2	1,0	45,2
5000,0	71,4	49,6	41,2	0,5	41,7
6300,0	69,0	47,3	38,8	-0,1	38,7
8000,0	66,7	44,9	36,5	-1,1	35,4
10000,0	63,8	42,0	33,6	-2,5	31,1
	98,417018	76,656105	68,2		61,1

Tabla 5. 9

El resultado en este caso es de 61,1 dBA. A continuación se muestran los valores para cada tipo de asfalto.

<i>Tipo de pavimento</i>	
<b>TBC</b>	61,1 dBA
<b>CSD 2/4</b>	63,3 dBA
<b>EAC</b>	61,3 dBA
<b>PA 6/16</b>	61,5 dBA
<b>2PA 4/8 – 11/16</b>	59,1 dBA
<b>SMA 0/6</b>	60,2 dBA
<b>SD 4/8</b>	64,0 dBA

Tabla 5. 10

En nuestro caso el dato medido real es de 64,6 dBA por lo que al pavimento que más se acerca es al SD 4/8.

Comparar los datos medidos de los predichos de forma global con el índice  $L_{Aeq}$  resulta complicado ya que entran en juego variables que cambian en cada medida como la distancia del sonómetro y el tiempo de medida. Por eso se utiliza el índice  $L_{W,0}$ , de esta forma se simplifica la comparación ya que permite englobar todos los datos por categorías y velocidades.

Una vez obtenido el  $L_{W,0}$  se ha calculado su valor promedio y su desviación estándar (en banda ancha y tercio de octava), para de esta forma poder comparar como se asemejan las curvas medida y calculada de forma global.

El cálculo de  $L_{W,0}$  se hace mediante esta fórmula, con la cual se eliminan esas dos variables:

$$L_{W,0} = L_{Aeq} + 3 + 10 \log(h) - 10 \log\left(\frac{N}{T \cdot V}\right)$$

Ecuación 5. 11

Donde:

- "N" es el número de vehículos que pasaron durante esa medida.
- "T" es el tiempo en segundos de la medida.
- "V" es la velocidad del vehículo en m/s
- "h" es la distancia entre el vehículo y el sonómetro
- "LAeq" es el nivel sonoro ponderado A en el receptor calculado previamente.

Aplicada sobre el ejemplo anterior cuyos datos son T=18 s, N=1, h= 3,5 m y v= 8,3 m/s:

Freq. (Hz)	Laeq (dBA)	LW,0 (dBA)
25,0	12,9	43,1
31,5	20,8	51,0
40,0	26,2	56,4
50,0	38,6	68,8
63,0	30,3	60,5
80,0	30,7	60,9
100,0	37,7	67,9
125,0	34,5	64,7
160,0	39,1	69,3
200,0	43,6	73,8
250,0	45,5	75,7
315,0	48,3	78,5
400,0	46,9	77,1
500,0	52,2	82,4
630,0	52,9	83,1
800,0	56,7	86,9
1000,0	57,1	87,3
1250,0	56,4	86,6
1600,0	56,3	86,5
2000,0	54,5	84,7
2500,0	50,1	80,3
3150,0	46,4	76,6
4000,0	43,3	73,5
5000,0	38,2	68,4
6300,0	33,6	63,8
8000,0	29,1	59,3
10000,0	23,9	54,1
	64,6	94,8

Tabla 5. 11

## 6. RESULTADOS

A la hora de presentar los resultados, mostraremos gráficamente la comparación de los datos predichos por CNOSSOS con la media de los datos medidos.

El número de medidas son las siguientes:

TIPO	CANTIDAD	DESGLOSE
LIGEROS	203	20KMH-24 30KMH-75 40KMH-83 50KMH-20 70KMH-1
PESADOS MEDIOS	32	20KMH-5 30KMH-12 40KMH-11 50KMH-2 60KMH-2
PESADOS	24	30KMH-8 40KMH-6 60KMH-11 70KMH-2
CICLOMOTORES	6	30KMH-3 40KMH-2 60KMH-1
MOTOCICLETAS	7	30KMH-5 40KMH-2
<b>TOTAL</b>	<b>272</b>	

### 6.1. Potencia instantánea de la fuente según categoría y velocidad.

Como se ha explicado en el apartado anterior utilizaremos el valor de la potencia instantánea de la fuente ( $L_{W,0}$ ). Se han calculado para cada una de estas variables su valor promedio y su desviación estándar (en banda ancha y tercio de octava), para observar cómo se asemejan las curvas medida y calculada.

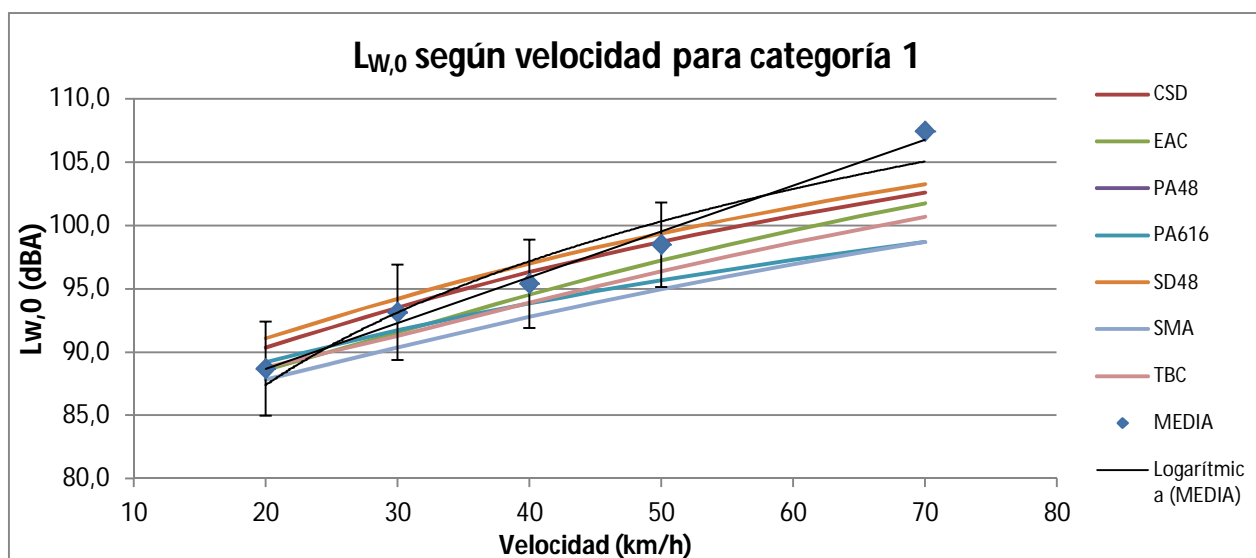


Fig. 6. 1  $L_{W,0}$  medido y predicho para vehículos de categoría 1.

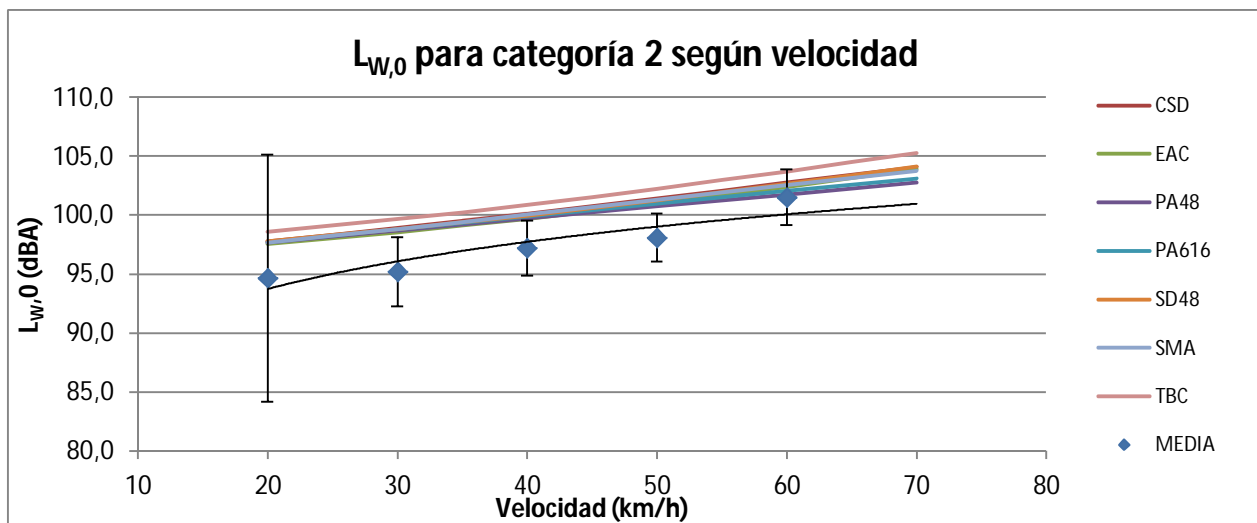


Fig. 6. 2.  $L_{W,0}$  medido y predicho para vehículos de categoría 2.

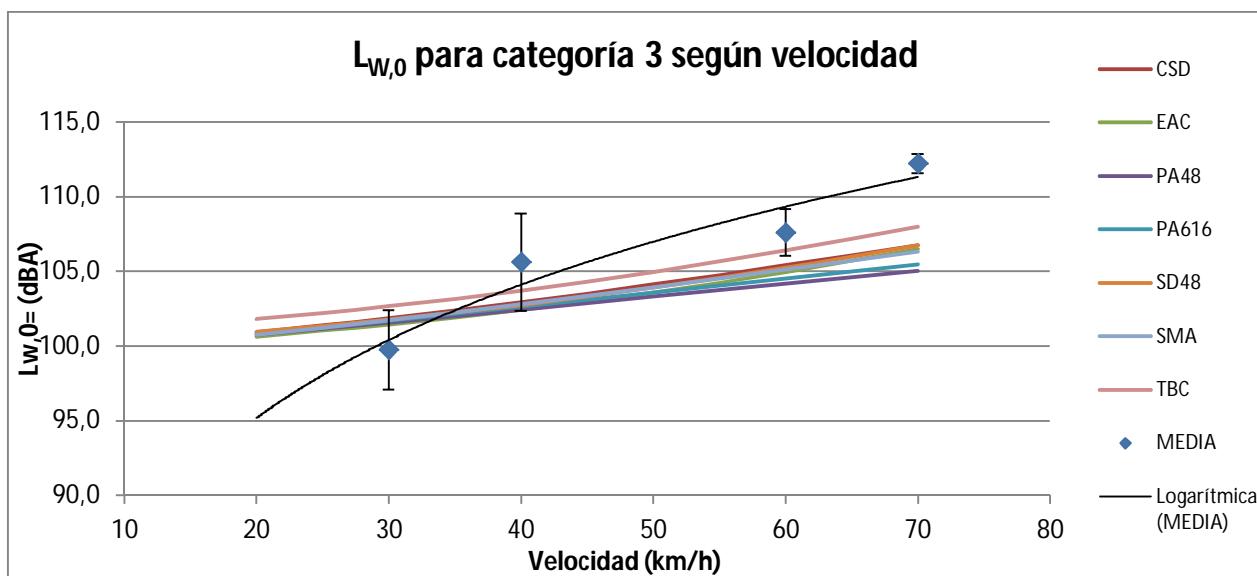


Fig. 6. 3.  $L_{W,0}$  medido y predicho para vehículos de categoría 3.

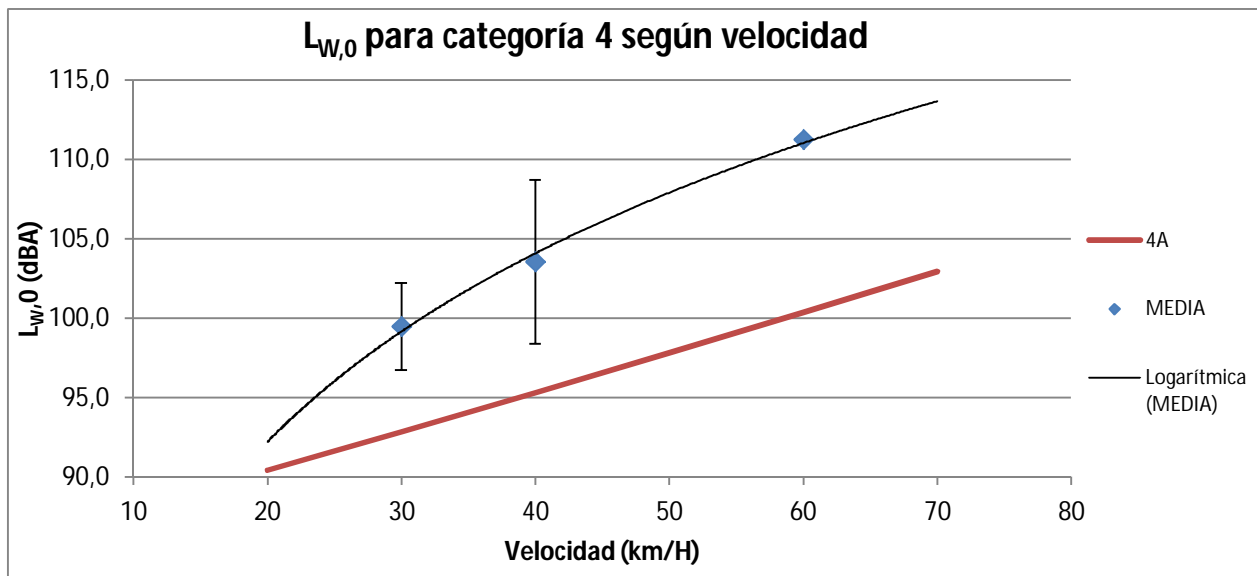


Fig. 6. 4.  $L_{W,0}$  medido y predicho para vehículos de categoría 4ª.

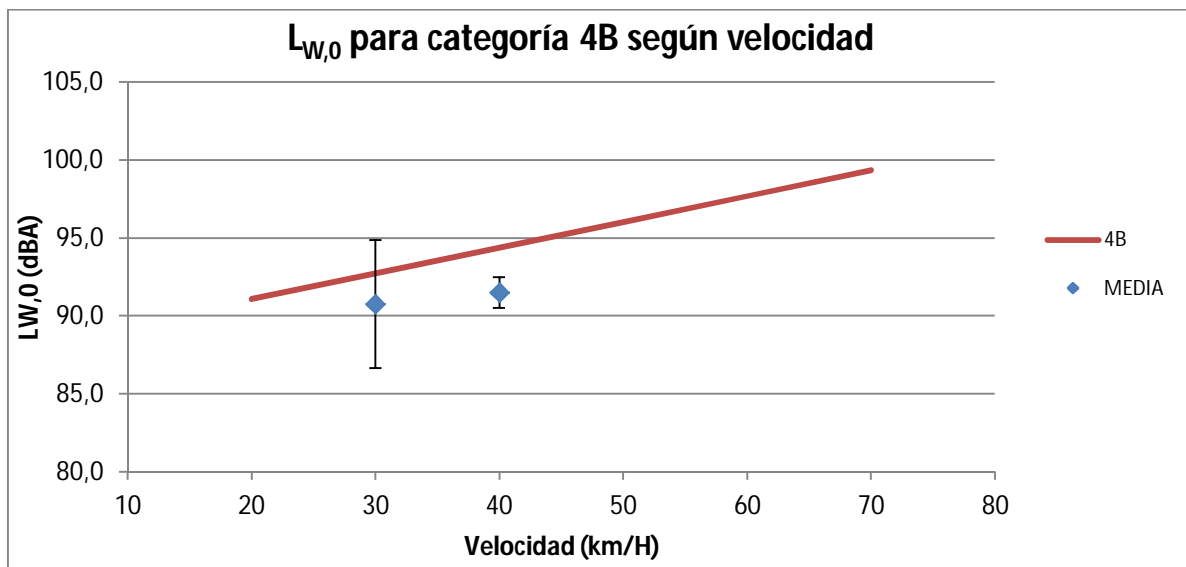


Fig. 6. 5.  $L_{W,0}$  medido y predicho para vehículos de categoría 4B.

## 6.2. Potencia instantánea de la fuente ( $L_{W,0}$ ) en tercios de octava según diferentes pavimentos

En esta serie de gráficas se muestra el nivel promedio  $L_{W,0}$  junto a su desviación estándar para una categoría y velocidad determinada, junto a los valores predichos para los diferentes tipos de asfalto. Se muestran solo dos gráficas, el resto se encuentran en el anexo 6.

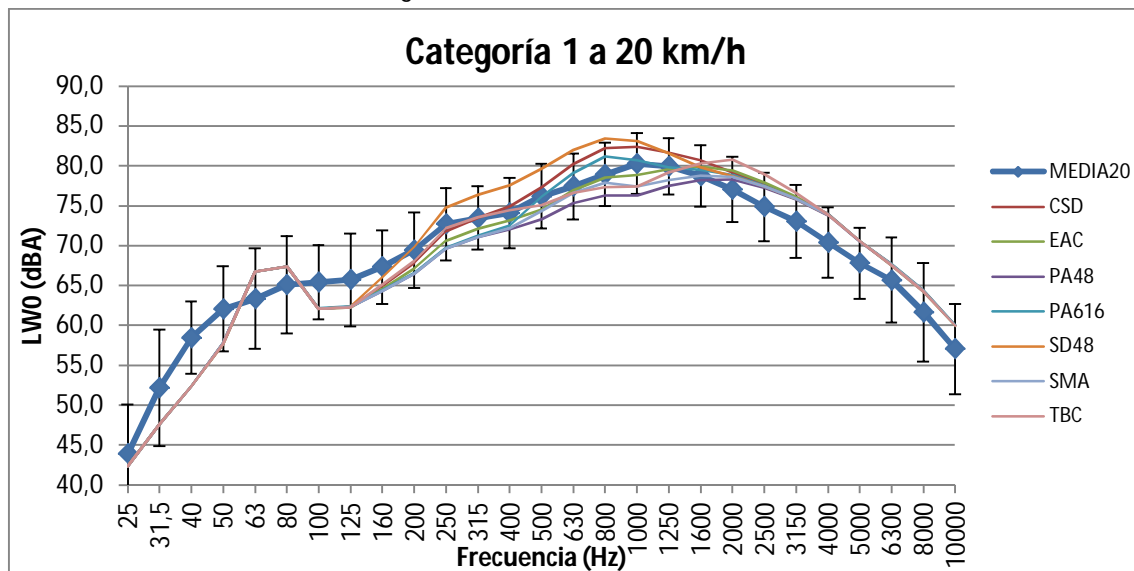


Fig. 6. 6.  $L_{W,0}$  medido y predicho según frecuencia para vehículos de categoría 1 a 20km/h.

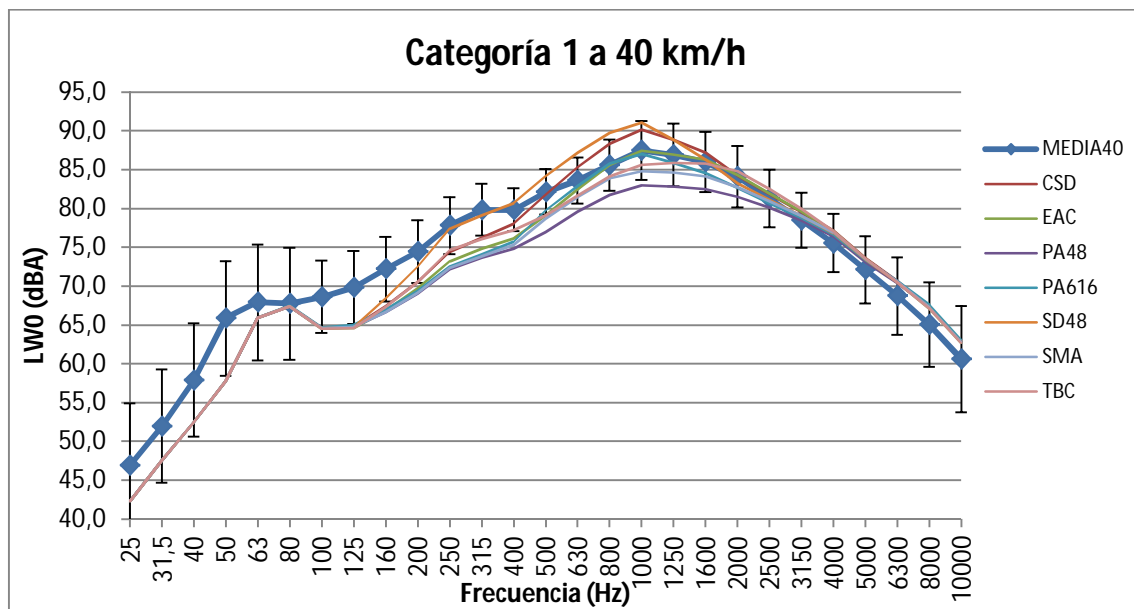


Fig. 6. 7.  $L_{W,0}$  medido y predicho según frecuencia para vehículos de categoría 1 a 40km/h.



### 6.3. Comparativa distintas velocidades de la misma categoría

Otro tipo de gráfica es en la que se representan los valores de la potencia instantánea  $L_{W,0}$  para cada velocidad, en tercios de octava para cada categoría.

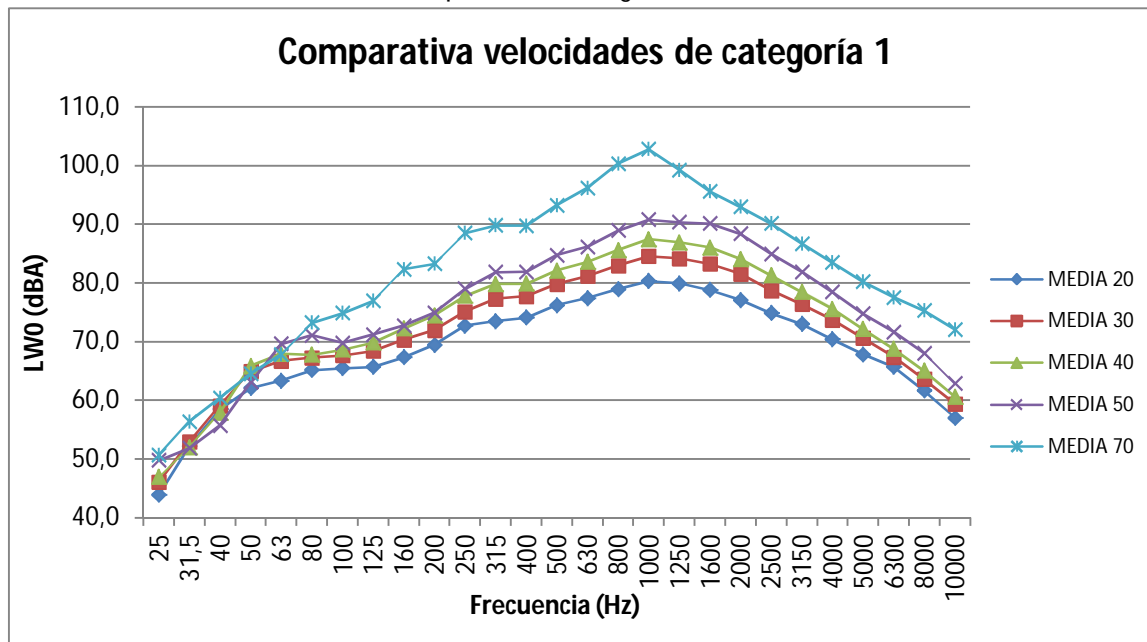


Fig. 6. 8.  $L_{W,0}$  medido para distintas velocidades según frecuencia.

### 6.4. Nivel de ruido equivalente ( $L_{Aeq}$ ) de la fuente según categoría y velocidad.

Es interesante mostrar el  $L_{Aeq}$  calculado frente al medido. Pero cada medida tiene una distancia al sonómetro y un tiempo de medida diferente. Por eso para poder mostrar gráficamente el  $L_{Aeq}$  se han seleccionado las medidas en las que estas dos variables coinciden, y solo se ha podido realizar en vehículos ligeros a 20, 30 y 40 km/h, ya que para otras categorías y velocidades no se tienen suficientes pasos con las mismas características.

Se ha realizado la media de las medidas realizadas a 3 metros de distancia entre el sonómetro y la vía y con 15 segundos de medición, ya que son los que más se dan y se han comparado con los niveles de  $L_{Aeq}$  predichos por CNOSSOS para los distintos tipos de medida.

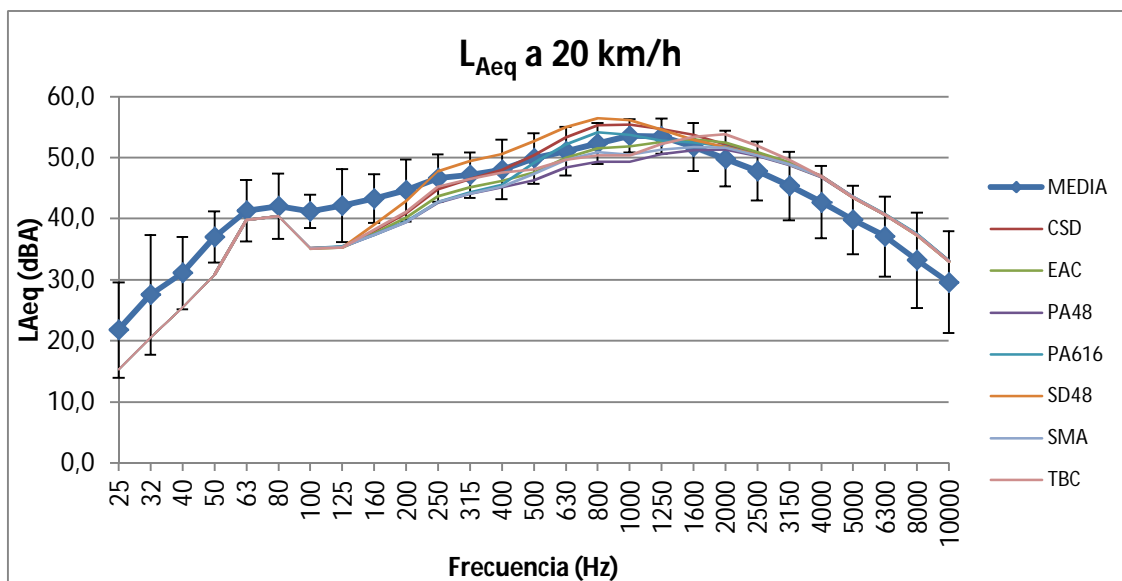


Fig. 6. 9.  $L_{Aeq}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 20km/h.

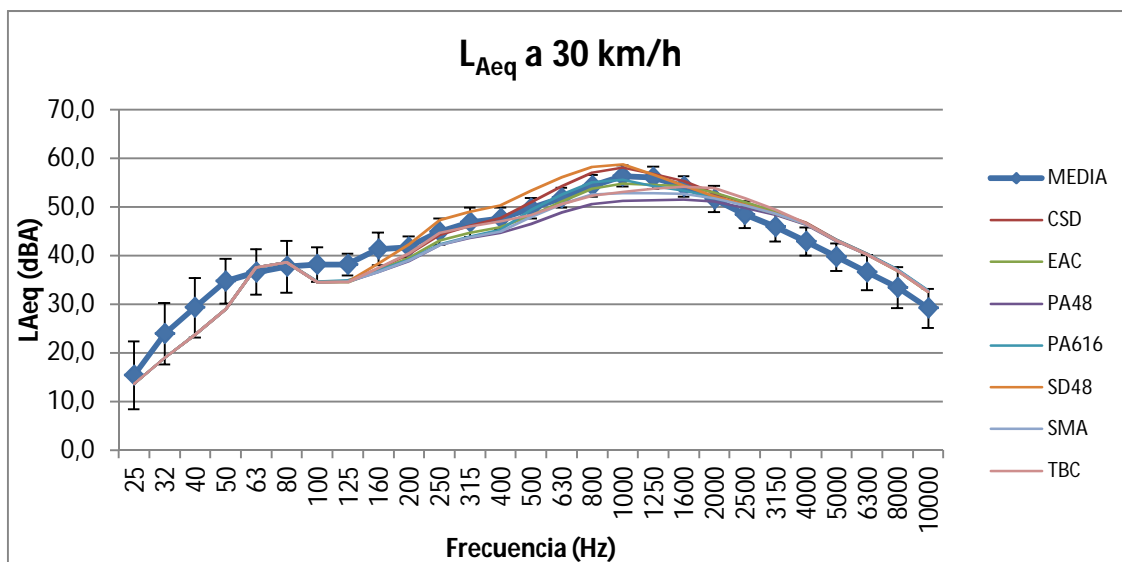


Fig. 6. 10  $L_{Aeq}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 40km/h.

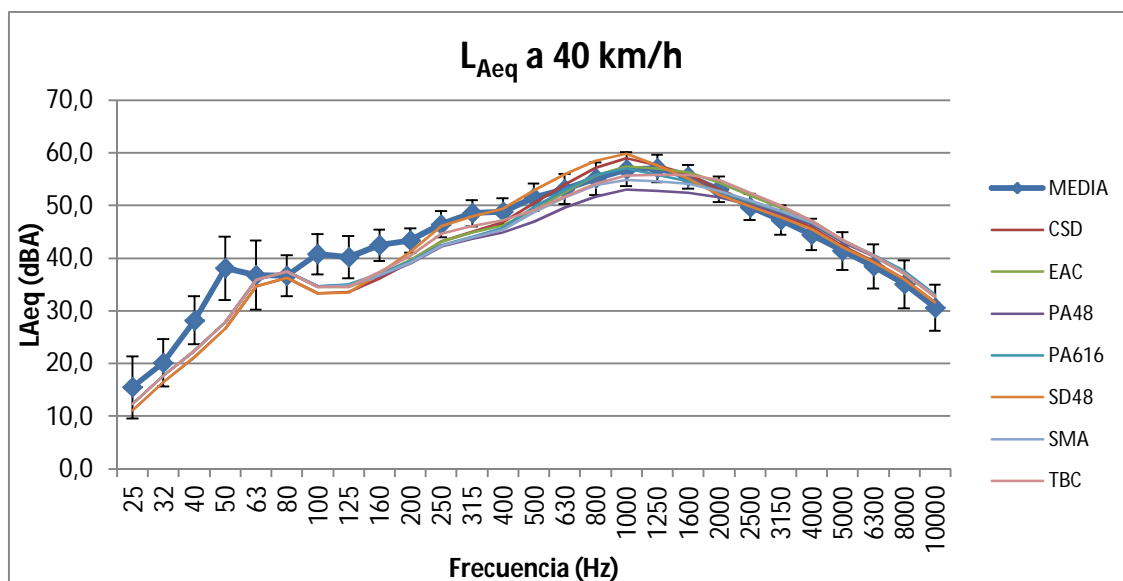


Fig. 6. 11. L<sub>Aeq</sub> medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 40km/h.

## 7. ANÁLISIS

### 7.1. Potencia instantánea de la fuente $L_{W,0}$ según categoría y velocidad.

A continuación se comentarán y explicarán las gráficas anteriores. En la figura 6.1 correspondiente a la categoría 1 se observa que los datos concuerdan muy bien excepto para 70 km/h, ya que para 70 solo se tiene un paso registrado. Para 60 km/h no hay dato, ya que no hay ningún paso registrado. A 20 km/h la línea de tendencia se asemeja a las líneas de SMA, TBC y PA616; para el resto de velocidades observamos una mayor concordancia para los asfaltos CSD, EAC, SD48 y TBC que corresponden con superficies duras y más ruidosas. La línea debería asemejarse más a estas últimas superficies ya que las superficies de medida normalmente eran de estas características.

En la siguiente gráfica (6.2) correspondiente a vehículos de categoría 2, la pendiente de la curva de tendencia es similar a las curvas de los datos predichos. Pero se observa que el nivel no concuerda para ninguna velocidad, excepto para 60 km/h, donde sí que los datos medidos encajan con los predichos. Al tener pocos datos es comprensible obtener esta diferencia.

En el caso de vehículos pesados (6.3), la pendiente de la curva de tendencia es más pronunciada que en el caso de los datos predichos, cuya pendiente es muy baja. Las velocidades que más concuerdan son las bajas, 30 y 40 km/h. En 60 km/h también se acerca bastante. Sin embargo a 70 km/h los valores medidos quedan alrededor de 6 dBA por encima de los predichos.

Una vez más, la falta de datos desemboca en una menor fiabilidad.

Para la categoría 4, tanto 4A como 4B (6.4 y 6.5) que corresponde a ciclomotores y a motocicletas, la falta de datos hace que no haya apenas concordancia. Quizás haya mayor fiabilidad para las motocicletas, en concreto para la velocidad de 30 km/h sí que encaja dentro de la desviación permitida. Esto se debe a que para esa velocidad hay 5 pasos registrados, mientras que para los demás no se pasa en ningún caso de 2, con lo que la muestra no es significativa.

## 7.2. Potencia instantánea de la fuente $L_{W,0}$ en tercios de octava según diferentes pavimentos

Al analizar los datos en frecuencia, que era el propósito final de este proyecto, las curvas de datos medidos y las predichas por el modelo CNOSSOS sí que guardan una mayor semejanza. Una vez más todo dependerá de la cantidad de datos registrados.

El espectro en las tres primeras categorías guarda una gran semejanza entre datos medidos y predichos, sin embargo en la categoría 4, y en gran medida debido a la escasez de datos registrados, no se puede afirmar que haya una concordancia clara.

En concreto para la primera categoría los valores encajan perfectamente para las velocidades de 20 y 30 km/h. Solo queda fuera del límite fijado por la desviación estándar un tipo de superficie, SD48. Encaja casi perfectamente en todas frecuencias, destacando que donde mayor error se obtiene es a bajas frecuencias. A partir de 160 Hz se obtiene la mayor correlación.

A 40 y 50 km/h la concordancia también es buena, pero comparado con los casos anteriores hay más curvas predichas que quedan fuera del margen de error marcado por la desviación típica.

A 60 y 70 km/h debido a la escasez de muestras las curvas referentes a la media no son tan representativas y por eso generan un mayor error.

Respecto a las demás categorías el error generado es mayor, debido nuevamente a la reducción de pasos registrados. En la categoría 2 las curvas teóricas tienden a quedar por debajo de la medida, por lo que se deduce que no se ha llegado a alcanzar el nivel de ruido predicho.

En la categoría 3 pese a tener pocos pasos registrados, las curvas concuerdan, sobre todo en las frecuencias centrales. Esto nos puede indicar que los pasos, estaban correctamente registrados, y sus características eran las acordes a esta categoría.

## 7.3. Comparativa distintas velocidades de la misma categoría

En esta gráfica (6.8) los valores aumentan según la velocidad. En todas velocidades se produce un máximo en torno a la frecuencia de 1KHz, exceptuando la curva de 70 km/h, las demás nunca se separan más de 3 dBA, siendo en este punto donde mayor es esta separación.

Todas curvas siguen un patrón muy similar, variando exclusivamente el nivel sonoro.

#### 7.4. Nivel de ruido equivalente ( $L_{Aeq}$ ) de la fuente según categoría y velocidad.

Estas gráficas (6.9, 6.10 y 6.11) ofrecen unos resultados muy similares a los de  $L_{W,0}$ . En teoría estas gráficas deberían ofrecer la mayor correlación de todas, pero teniendo en cuenta que la cantidad de pasos registrados con las mismas características es menor, los resultados son aceptables. Igual que en ese caso a partir de 200 Hz se obtiene una mayor correlación, destacando que en las frecuencias más bajas y las más altas, aumenta el error.

## 8. CONCLUSIONES

Recordemos que el objetivo principal de este proyecto era evaluar la concordancia existente entre el modelo de predicción de ruido para tráfico rodado, última versión de CNOSSOS de 2012, y las medidas tomadas en unas calles determinadas. Para los vehículos ligeros (categoría 1), la concordancia ha sido muy buena.

Los vehículos ligeros han representado el 75% del total de vehículos registrados en este proyecto. La concordancia que existe entre los valores predichos por CNOSSOS y los valores medidos, sobre todo en la categoría 1, nos permite concluir como válidas las predicciones del modelo.

Hemos comparado 3 tipos de datos, la potencia instantánea en la fuente en banda ancha ( $L_{W,0}$ ), la potencia instantánea en tercios de octava, y el nivel de ruido equivalente en tercios de octava  $L_{Aeq}$ . Y en el caso de los vehículos ligeros ha producido unos resultados muy buenos en los que las diferencias en ningún caso han superado los 6 dBA entre los valores predichos y los medidos.

En todos los casos se ha observado que entre las frecuencias de 250 Hz y 1250 Hz es donde mayor concordancia se observa. Y en más bajas y más altas donde mayor diferencia se genera.

Respecto a los tipos de asfaltos, la variación es considerable. No existe ningún asfalto en concreto de los presentados que muestre una diferencia cualitativa respecto a los demás. En sentido contrario, en vehículos de categoría 1, el asfalto denominado SD 4/8, ha sido el que peores resultados ha obtenido.

Por tanto el nivel de ruido equivalente y la potencia instantánea en la fuente en tercios de octava predichos por CNOSSOS ofrece unos valores acordes con los registrados en nuestras medidas. En el caso de los vehículos ligeros queda demostrado, no así con el resto de categorías que, debido a los pocos pasos registrados, no se ha podido hacer una comparación con el suficiente nivel de confianza. Pese a esto, se ha notado que a medida que crece el número de pasos registrados, el error se reduce.

Sírva como ejemplo que sin tener apenas pasos de vehículos pesados, los valores eran muy dispares, pero tras llevar una pequeña campaña especializada de medidas de vehículos pesados, los resultados mejoraron notablemente. Por lo que se puede inducir que con un número mayor de pasos, los resultados serían muy similares a los de la categoría 1.

En el caso de la potencia instantánea en banda ancha, la categoría 1 ha ofrecido unos resultados muy buenos para las velocidades más bajas entre 20 y 40 km/h. No para las altas, dado que no existían apenas datos. Sin embargo, para el resto de las categorías los errores son mayores, en los vehículos de categoría 2, la mayor diferencia es de 10 dBA, en categoría 3 no se supera en ningún caso los 5 dBA de diferencia, y en los vehículos de dos ruedas (ciclomotores) las diferencias son muy superiores, siempre superando los 12 dBA.

Las principales incertidumbres del trabajo han consistido en el desconocimiento de las características de los pavimentos sobre los que se han realizado las medidas, así como la

precisa determinación de la velocidad de paso de los vehículos. Teniendo en cuenta estas incertidumbres, valoramos los resultados y conclusiones como razonablemente satisfactorios. En definitiva, el modelo CNOSSOS-EU (para los resultados obtenidos por nosotros en este proyecto), parece predecir correctamente los niveles sonoros generados por el tráfico rodado.

## 8.1. Propuestas de mejora.

Los resultados podrían haberse mejorado teniendo en cuenta estas medidas presentadas en orden de importancia:

1. Captar la velocidad real del vehículo mediante algún dispositivo para tal efecto.
2. Estudiar cada pavimento sobre el que se realizan las medidas, y conocer sus coeficientes, utilizados en el proceso de cálculo del valor predicho.
3. Hacer campañas de medidas especializadas para cada categoría, pudiéndose centrar de esta manera, en vías transitadas por un tipo de vehículos concretos.
4. Sobre una misma vía realizar varias medidas, para poder comparar así los valores de  $L_{Aeq}$ , de forma que coincida en mayor medida la velocidad y la distancia entre sonómetro y vía.

## 9. REFERENCIAS

- Comparativa de nuevos modelos europeos de predicción de niveles de ruido de tráfico rodado. [http://www.labcatt.cat/attachments/File/AAM\\_002.pdf](http://www.labcatt.cat/attachments/File/AAM_002.pdf)
- Evaluación y gestión del ruido, Unión Europea.  
[http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/noise\\_pollution/l21180\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/noise_pollution/l21180_es.htm)
- Versión CNOSSOS 2012.  
[http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/26390/1/cnossos-eu%20jrc%20reference%20report\\_final\\_on%20line%20version\\_10%20august%202012.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/26390/1/cnossos-eu%20jrc%20reference%20report_final_on%20line%20version_10%20august%202012.pdf)
- Draft JRC Reference Report on Common NOise ASsessment MethOdS in EU (CNOSSOS-EU) to be used by the EU Member States for strategic noise mapping after adoption as specified in the Directive 2002/49/EC Version 2d, 28 May 2010
- Directiva 2002/49/CE. <http://sicaweb.cedex.es/docs/leyes/Directiva-2002-49-CE-Evaluacion-gestion-ruido-ambiental.pdf>
- Trabajo sobre ruido de tráfico rodado.  
[http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(7\)%20El%20ruido%20de%20las%20ciudades/el%20ruido%20del%20trafico.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(7)%20El%20ruido%20de%20las%20ciudades/el%20ruido%20del%20trafico.htm)
- H.G. Jonasson, Acoustical Source Modelling of Road Vehicles, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 93, (2007)



## 10. ANEXOS

### 1.1. Anexos capítulo 2

**Anexo 2.1.** Coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos en tráfico rodado.

Tabla de coeficientes para  
vehículos de categoría 3.

1/3 octave band center freq. (Hz)	$A_R$	$B_R$	$A_P$	$B_P$	$C_P$
25	79.5	33.0	95.7	0.0	5.0
31.5	79.5	33.0	94.9	0.0	5.0
40	79.5	33.0	94.1	0.0	5.0
50	81.5	30.0	96.8	-4.0	9.0
63	82.5	30.0	101.8	0.0	9.0
80	82.5	30.0	98.6	4.0	9.0
100	85.5	31.4	95.5	3.0	9.0
125	87.3	32.8	98.2	3.0	9.0
160	87.7	36.0	95.7	3.0	9.0
200	87.3	34.8	97.2	4.0	9.0
250	89.5	32.7	96.3	5.0	5.0
315	90.5	29.3	97.2	5.0	5.0
400	93.8	26.4	95.8	5.0	5.0
500	95.9	24.2	95.9	5.0	5.0
630	97.3	25.9	98.8	5.0	5.0
800	98.0	30.4	95.1	5.0	5.0
1000	95.6	32.3	95.6	5.0	5.0
1250	93.2	36.5	95.0	5.0	5.0
1600	91.9	36.8	92.7	5.0	5.0
2000	88.9	38.0	91.2	5.0	5.0
2500	85.5	36.8	88.7	5.0	5.0
3150	84.1	38.3	87.6	5.0	5.0
4000	82.2	38.9	87.2	5.0	5.0
5000	79.8	38.5	84.2	5.0	5.0
6300	78.6	40.2	82.7	5.0	5.0
8000	77.5	40.8	79.7	5.0	5.0
10000	76.8	41.0	77.6	5.0	5.0

Tabla de coeficientes para  
vehículos de categoría 1.

1/3 octave band center freq. (Hz)	$A_R$	$B_R$	$A_P$	$B_P$	$C_P$
25	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
31.5	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
40	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
50	74.9	30.0	87.9	0.0	7.0
63	74.9	30.0	80.8	-3.0	7.0
80	74.9	30.0	89.9	0.0	7.0
100	79.3	41.0	86.9	8.0	7.0
125	82.0	41.2	82.6	6.0	7.0
160	81.2	42.3	81.9	6.0	7.0
200	80.8	41.6	82.3	7.0	7.0
250	78.9	38.6	83.9	8.0	4.0
315	78.6	35.5	83.3	8.0	4.0
400	80.5	32.9	82.4	8.0	4.0
500	85.0	25.0	80.6	8.0	4.0
630	87.8	29.0	80.2	8.0	4.0
800	90.9	27.0	77.8	8.0	4.0
1000	93.3	33.4	76.0	8.0	4.0
1250	92.8	36.7	81.4	8.0	4.0
1600	91.5	37.0	82.3	8.0	4.0
2000	88.5	37.5	82.6	8.0	4.0
2500	84.9	37.5	81.5	8.0	4.0
3150	81.6	38.6	80.2	8.0	4.0
4000	78.7	39.6	78.6	8.0	4.0
5000	74.9	40.0	75.6	8.0	4.0
6300	71.6	39.9	73.3	8.0	4.0
8000	69.1	40.2	71.0	8.0	4.0
10000	65.6	40.3	68.1	8.0	4.0

Tabla de coeficientes para  
vehículos de categoría 4a.

1/3 octave band center freq. (Hz)	$A_R$	$B_R$	$A_P$	$B_P$	$C_P$
25	0.0	0.0	86.7	-2.2	4.0
31.5	0.0	0.0	87.6	-0.1	4.0
40	0.0	0.0	85.5	1.7	4.0
50	0.0	0.0	85.8	5.9	7.0
63	0.0	0.0	81.5	1.9	7.0
80	0.0	0.0	80.7	3.3	7.0
100	0.0	0.0	82.0	0.9	7.0
125	0.0	0.0	85.6	17.3	7.0
160	0.0	0.0	81.6	14.5	7.0
200	0.0	0.0	81.4	5.0	7.0
250	0.0	0.0	85.5	14.6	4.0
315	0.0	0.0	86.3	8.9	4.0
400	0.0	0.0	87.9	9.7	4.0
500	0.0	0.0	88.7	12.7	4.0
630	0.0	0.0	89.9	12.3	4.0
800	0.0	0.0	91.8	13.9	4.0
1000	0.0	0.0	91.2	16.6	4.0
1250	0.0	0.0	92.4	17.2	4.0
1600	0.0	0.0	95.0	17.9	4.0
2000	0.0	0.0	94.1	19.3	4.0
2500	0.0	0.0	92.9	20.6	4.0
3150	0.0	0.0	90.4	19.9	4.0
4000	0.0	0.0	89.1	20.8	4.0
5000	0.0	0.0	87.4	20.5	4.0
6300	0.0	0.0	84.9	21.0	4.0
8000	0.0	0.0	84.4	21.0	4.0
10000	0.0	0.0	82.2	19.3	4.0

Tabla de coeficientes para  
vehículos de categoría 2.

1/3 octave band center freq. (Hz)	$A_R$	$B_R$	$A_P$	$B_P$	$C_P$
25	78.5	33.0	93.9	0.0	5.0
31.5	76.5	33.0	93.9	0.0	5.0
40	78.5	33.0	94.1	0.0	5.0
50	78.5	30.0	95.0	0.0	9.0
63	79.5	30.0	97.3	-4.0	9.0
80	79.5	30.0	98.1	0.0	9.0
100	82.5	32.8	92.5	4.0	9.0
125	84.3	35.8	91.9	5.0	9.0
160	84.7	38.1	90.4	5.5	9.0
200	84.3	36.3	93.4	6.0	9.0
250	87.4	33.5	94.4	6.5	5.0
315	87.8	30.6	94.2	6.5	5.0
400	89.8	27.7	93.0	6.5	5.0
500	91.6	21.8	90.8	6.5	5.0
630	93.5	23.8	92.1	6.5	5.0
800	94.6	28.4	92.5	6.5	5.0
1000	92.4	31.1	94.1	6.5	5.0
1250	89.6	35.4	94.5	6.5	5.0
1600	88.1	35.8	92.4	6.5	5.0
2000	85.9	36.7	90.1	6.5	5.0
2500	82.7	38.3	87.6	6.5	5.0
3150	80.7	37.7	85.8	6.5	5.0
4000	78.8	38.6	83.8	6.5	5.0
5000	76.8	39.8	81.4	6.5	5.0
6300	76.7	39.8	80.0	6.5	5.0
8000	75.7	40.2	77.2	6.5	5.0
10000	74.5	40.3	75.4	6.5	5.0

Tabla de coeficientes para  
vehículos de categoría 4b.

1/3 octave band center freq. (Hz)	$A_R$	$B_R$	$A_P$	$B_P$	$C_P$
25	0.0	0.0	80.5	2.1	4.0
31.5	0.0	0.0	88.9	3.1	4.0
40	0.0	0.0	89.2	1.2	4.0
50	0.0	0.0	90.5	2.3	7.0
63	0.0	0.0	89.2	2.8	7.0
80	0.0	0.0	80.7	4.2	7.0
100	0.0	0.0	93.2	6.2	7.0
125	0.0	0.0	93.2	4.8	7.0
160	0.0	0.0	90.0	7.3	7.0
200	0.0	0.0	88.4	11.3	7.0
250	0.0	0.0	87.6	10.6	4.0
315	0.0	0.0	87.7	13.9	4.0
400	0.0	0.0	87.0	13.5	4.0
500	0.0	0.0	87.4	11.0	4.0
630	0.0	0.0	89.4	10.8	4.0
800	0.0	0.0	89.9	11.4	4.0
1000	0.0	0.0	90.1	11.4	4.0
1250	0.0	0.0	89.7	11.7	4.0
1600	0.0	0.0	89.8	13.4	4.0
2000	0.0	0.0	88.2	11.6	4.0
2500	0.0	0.0	86.5	12.2	4.0
3150	0.0	0.0	85.8	10.9	4.0
4000	0.0	0.0	85.1	10.5	4.0
5000	0.0	0.0	85.1	12.0	4.0
6300	0.0	0.0	82.7	12.0	4.0
8000	0.0	0.0	81.7	12.0	4.0
10000	0.0	0.0	80.4	12.0	4.0

**Anexo.2.2.** Coeficientes para el cálculo del efecto de la aceleración.

Category $m$	$k = 1$ : crossing		$k = 2$ : roundabout	
	$C_R$	$C_P$	$C_R$	$C_P$
1	-4.5	+5.5	-4.4	+3.1
2	-4.0	+9.0	-2.3	6.7
3	-4.0	+9.0	-2.3	6.7
4a	--		--	
4b	--		--	

**Anexo 2.3.** Coeficientes para el cálculo del efecto de las ruedas con clavos.

Octave band centre frequency (Hz)	$a$	$b$
63	0	0
125	0	0
250	0	0
500	2.6	-3.1
1000	2.9	-6.4
2000	1.5	-14
4000	2.3	-22.4
8000	9.2	-11.4

**Anexo 2.4** Coeficientes para el cálculo de la corrección según superficies.

category 1		transversely brushed concrete	concrete with surface dressing 2/4	exposed aggregate concrete	PA <sup>(1)</sup> 6/16	2-layer PA <sup>(1)</sup> 4/8- 11/16	SMA <sup>(2)</sup> 0/6	surface dressing 4/8
$\alpha_{i,1}$	50 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	63 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	100 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	125 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	160 Hz	0.9	0.7	0.3	0.0	-0.5	0.0	1.7
	200 Hz	1.7	1.4	0.7	0.0	-1.1	0.0	3.4
	250 Hz	2.6	2.1	1.0	0.0	-1.6	0.0	5.1
	315 Hz	2.5	2.4	1.1	0.0	-2.2	0.0	5.3
	400 Hz	2.5	2.7	1.1	0.0	-2.7	0.0	5.4
	500 Hz	2.4	3.0	1.2	0.0	-3.3	0.0	5.6
	630 Hz	2.0	3.2	1.4	-0.4	-3.6	-0.7	5.3
	800 Hz	1.6	3.3	1.7	-0.7	-4.0	-1.3	4.9
	1 kHz	1.2	3.5	1.9	-1.1	-4.3	-2.0	4.6
	1.25 kHz	1.6	2.4	1.5	-2.2	-5.2	-2.3	2.6
	1.6 kHz	2.0	1.2	1.2	-3.4	-6.0	-2.6	0.5
	2 kHz	2.4	0.1	0.8	-4.5	-6.9	-2.9	-1.5
	2.5 kHz	1.6	-0.2	0.5	-4.8	-6.8	-2.7	-1.8
	3.15 kHz	0.8	-0.5	0.3	-5.0	-6.8	-2.4	-2.2
	4 kHz	0.0	-0.8	0.0	-5.3	-6.7	-2.2	-2.5
	5 kHz	0.0	-0.5	0.0	-3.5	-4.5	-1.5	-1.7
	6.3 kHz	0.0	-0.3	0.0	-1.8	-2.2	-0.7	-0.8
	8 kHz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10 kHz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
speed index ( $\beta_1$ )		6.0	-5.0	0.0	-11.0	-6.0	-5.0	-4.0
A-weighted correction at 70 km/h		1.4	2.7	1.3	-1.4	-4.6	-1.7	3.4

category 2, 3.		transversely brushed concrete	concrete with surface dressing 2/4	exposed aggregate concrete	PA <sup>(1)</sup> 6/16	2-layer PA <sup>(1)</sup> 4/8- 11/16	SMA <sup>(2)</sup> 0/6	surface dressing 4/8
$a_{L,1}$	60 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	63 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	80 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	100 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	125 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	160 Hz	0,8	0,7	0,3	0,0	-0,3	0,0	1,7
	200 Hz	1,7	1,4	0,7	0,0	-1,1	0,0	3,4
	250 Hz	2,6	2,1	1,0	0,0	-1,6	0,0	5,1
	315 Hz	2,5	2,4	1,1	0,0	-2,2	0,0	5,3
	400 Hz	2,5	2,7	1,1	0,0	-2,7	0,0	5,4
	500 Hz	2,4	3,0	1,2	0,0	-3,3	0,0	5,6
	630 Hz	2,0	3,2	1,4	-0,4	-3,6	-0,7	5,3
	800 Hz	1,6	3,3	1,7	-0,7	-4,0	-1,3	4,9
	1 kHz	1,2	3,5	1,9	-1,1	-4,3	-2,0	4,6
	1,25 kHz	1,6	2,4	1,5	-2,2	-5,2	-2,3	2,6
	1,6 kHz	2,0	1,2	1,2	-3,4	-6,0	-2,6	0,5
	2 kHz	2,4	0,7	0,8	-4,5	-6,9	-2,9	-1,5
	2,5 kHz	1,6	-0,2	0,5	-4,8	-6,8	-2,7	-1,8
	3,15 kHz	0,8	-0,5	0,3	-5,0	-6,8	-2,4	-2,2
	4 kHz	0,0	-0,8	0,0	-5,3	-6,7	-2,2	-2,5
	5 kHz	0,0	-0,5	0,0	-3,5	-4,5	-1,5	-1,7
	6,3 kHz	0,0	-0,3	0,0	-1,8	-2,2	-0,7	-0,8
	8 kHz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	10 kHz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
speed index ( $\beta_1$ )		0,0	-0,0	0,0	-11,0	-6,0	-0,0	-4,0
A-weighted correction at 70 km/h		1,4	2,7	1,3	-1,4	-4,6	-1,7	3,4

## 1.2. Anexos capítulo 6.

### Anexo 6.1

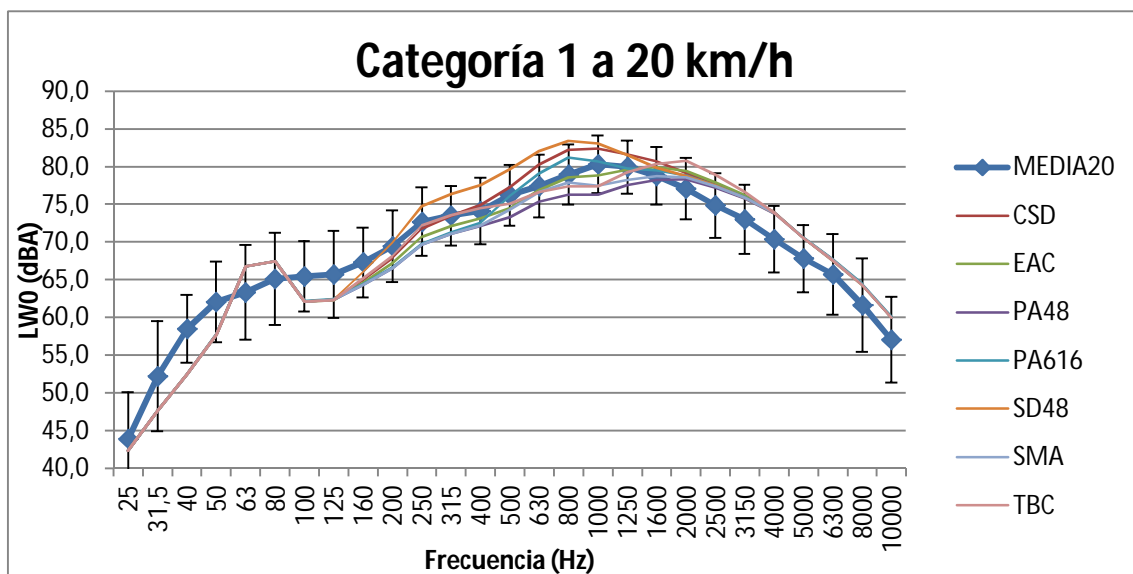


Fig. 6. 12.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 20km/h.

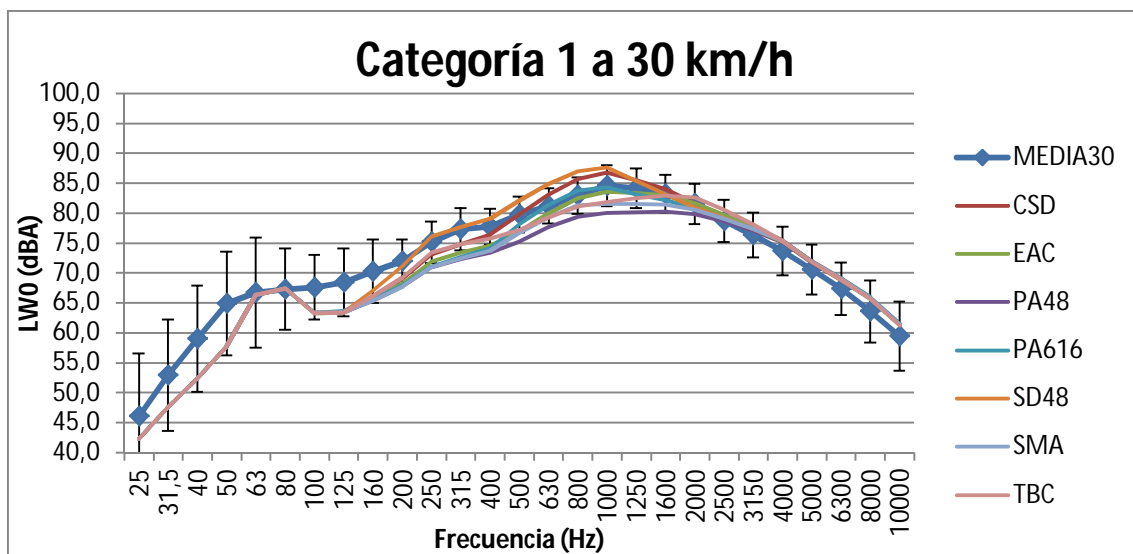


Fig. 6. 13.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 30km/h.

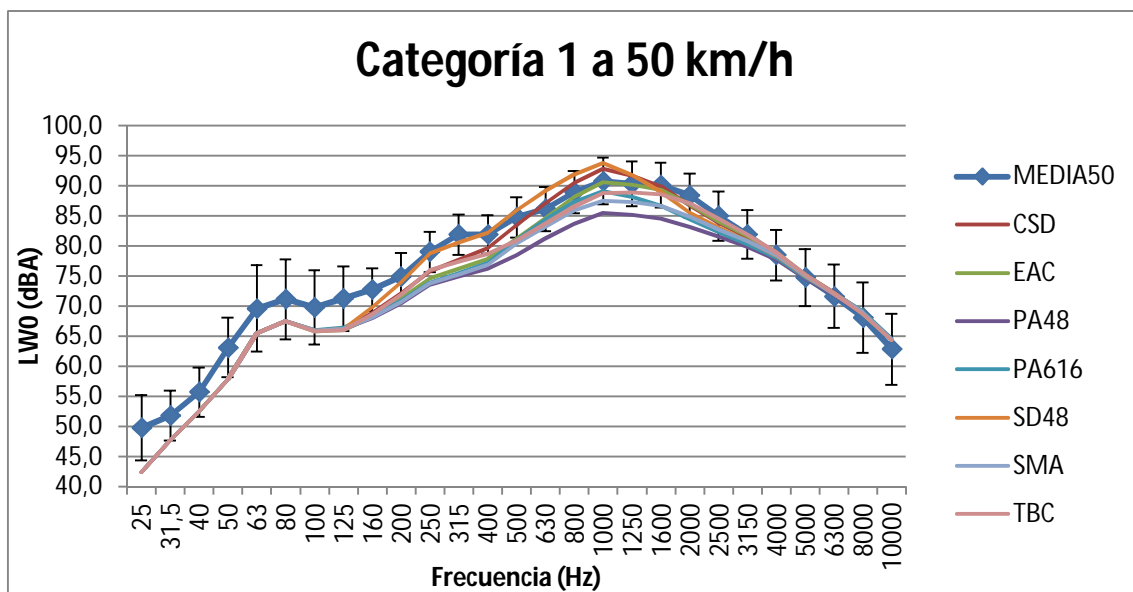


Fig. 6. 14.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 20km/h.

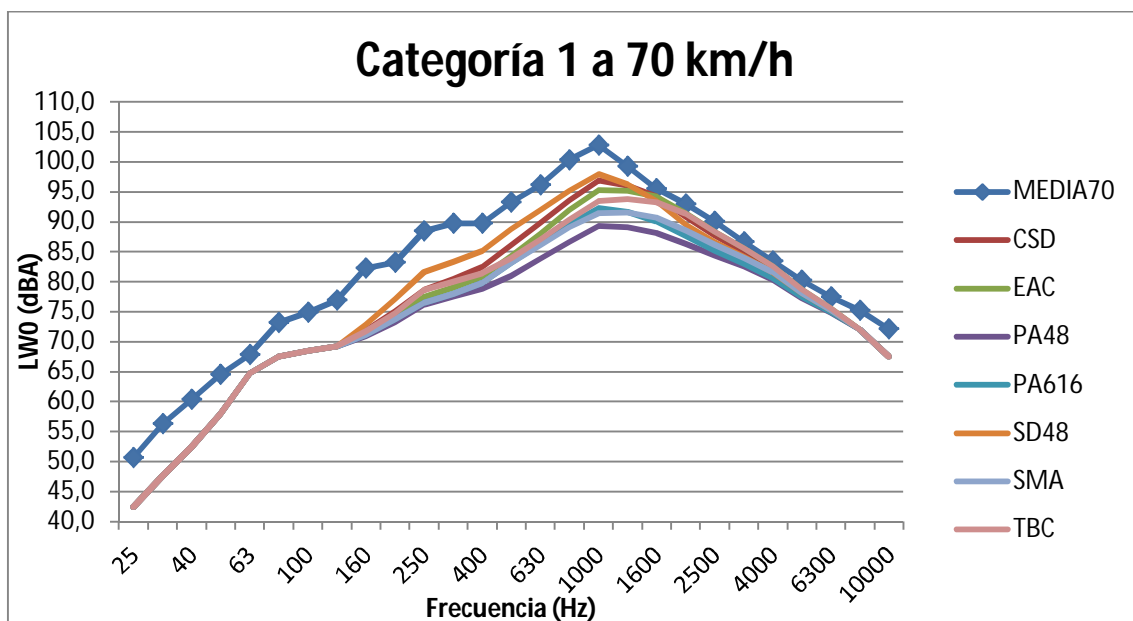


Fig. 6. 15.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 1 a 20km/h.



Anexo 6.2

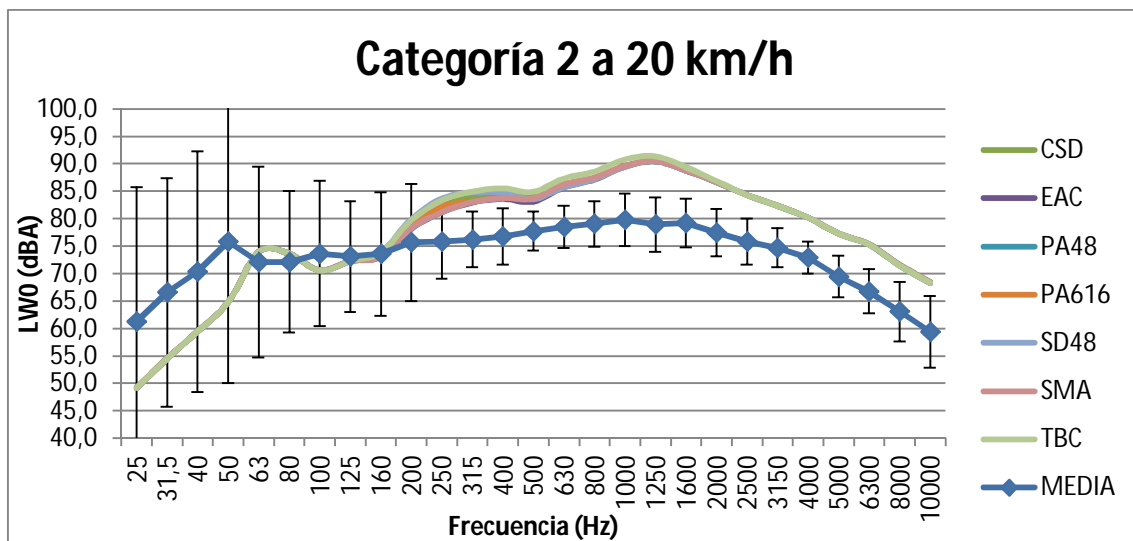


Fig. 6. 16.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 2 a 20km/h.

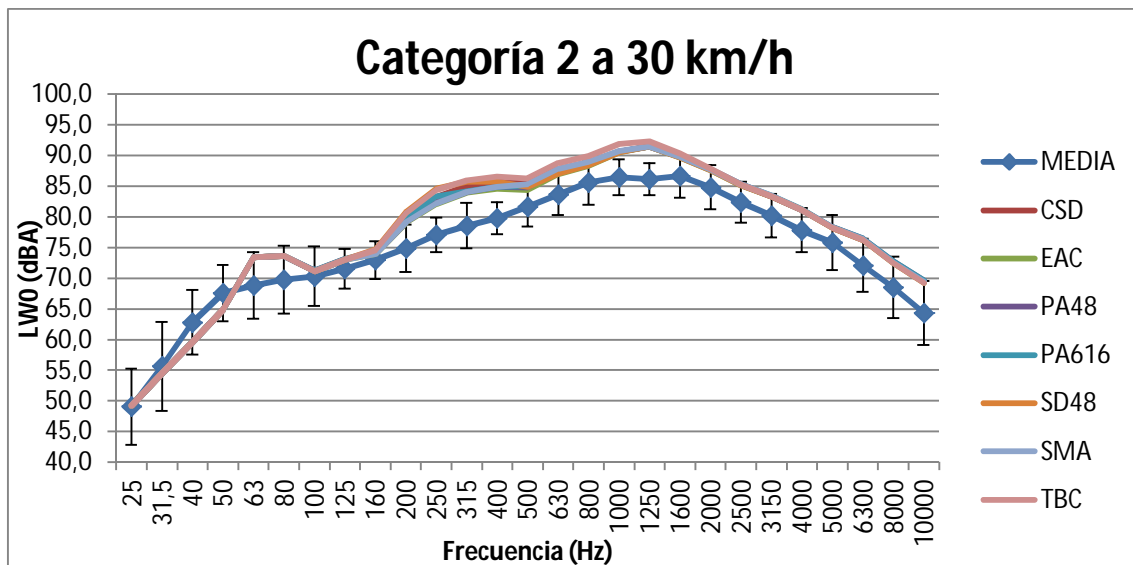


Fig. 6. 17  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 2 a 30km/h.

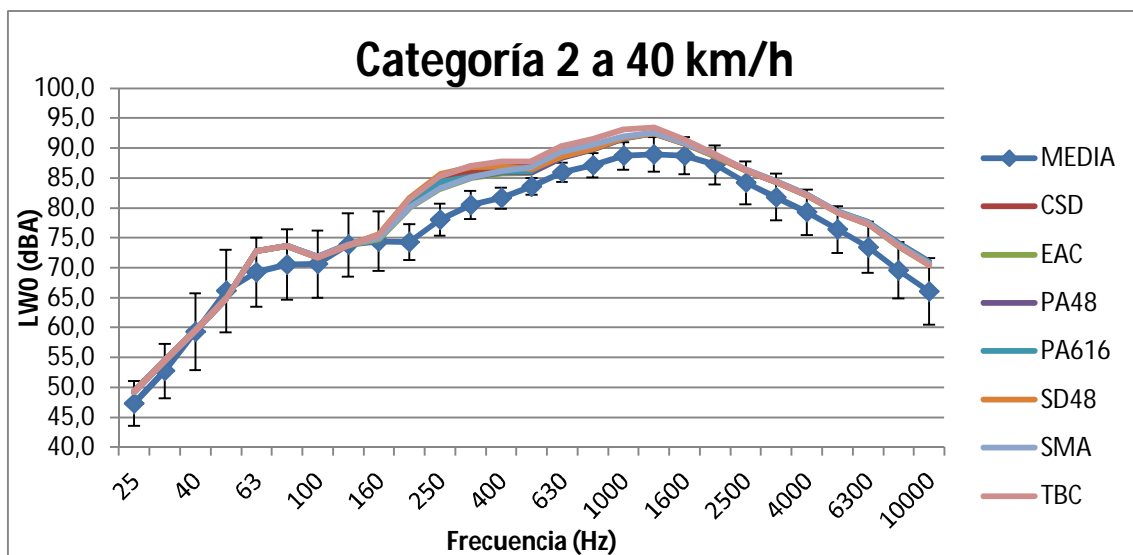


Fig. 6. 18.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 2 a 40km/h.

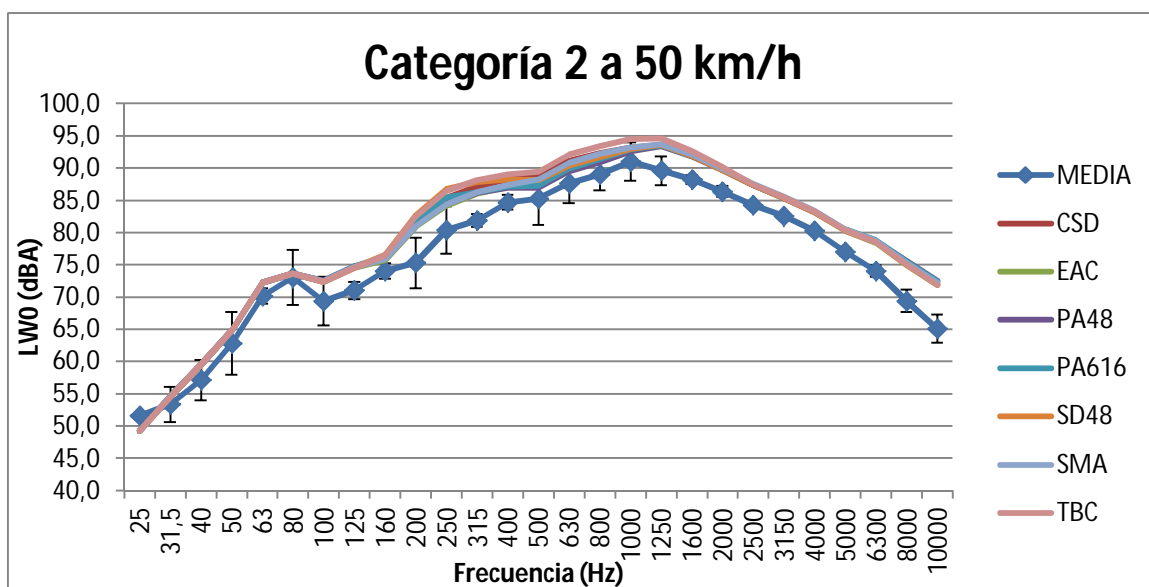


Fig. 6. 19.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 2 a 50km/h.



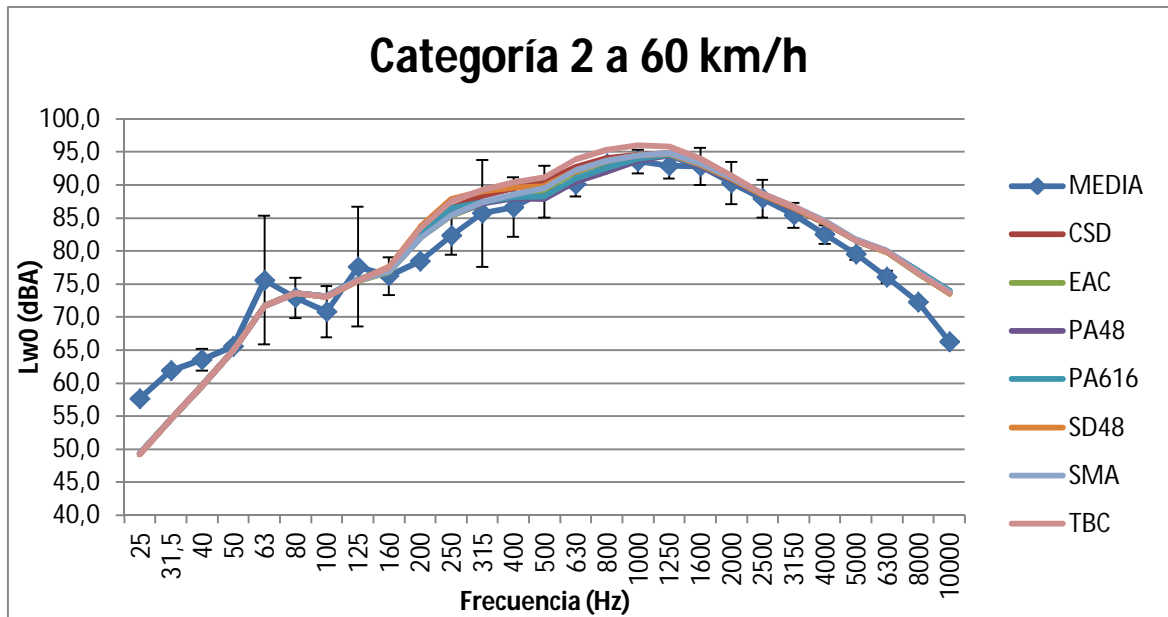


Fig. 6. 20.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 2 a 60km/h.

Anexo 6.3

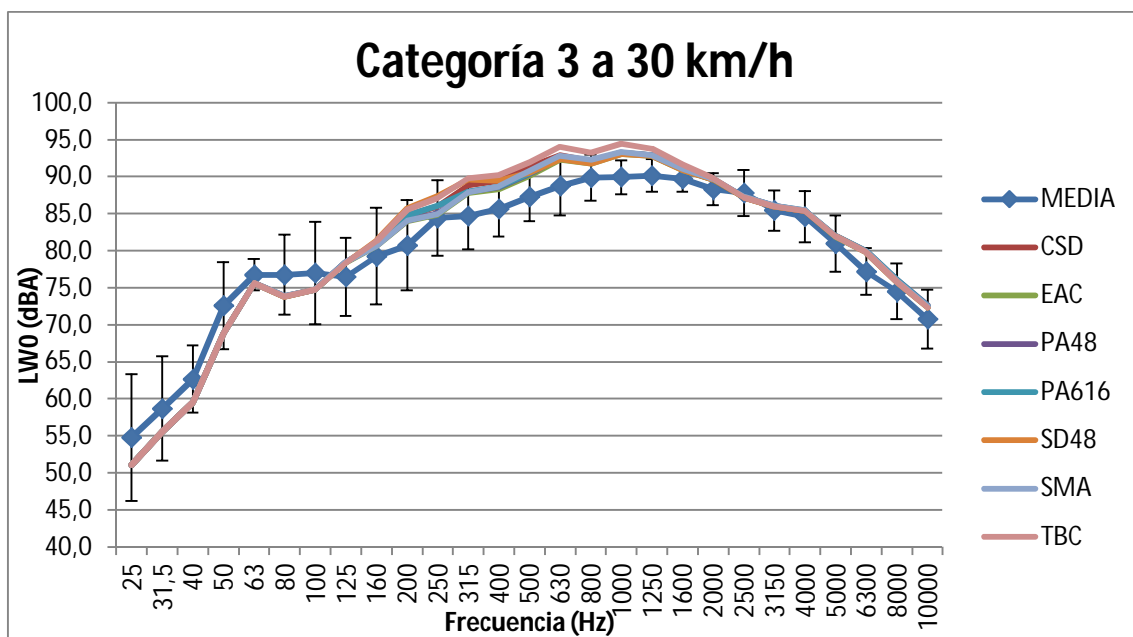


Fig. 6. 21.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 3 a 30km/h.

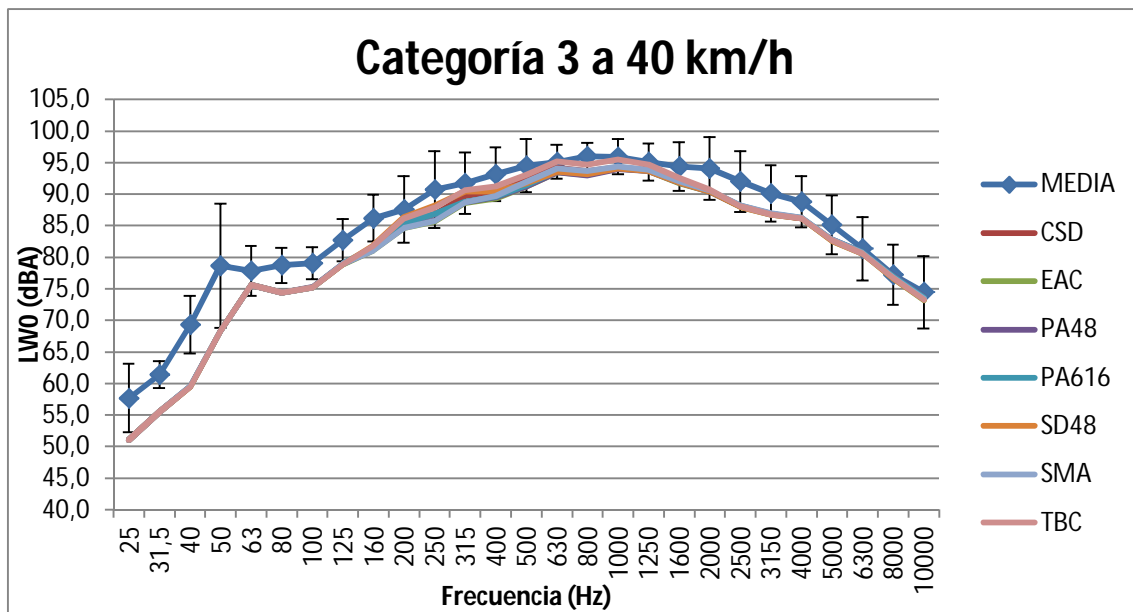


Fig. 6. 22.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 3 a 40km/h.

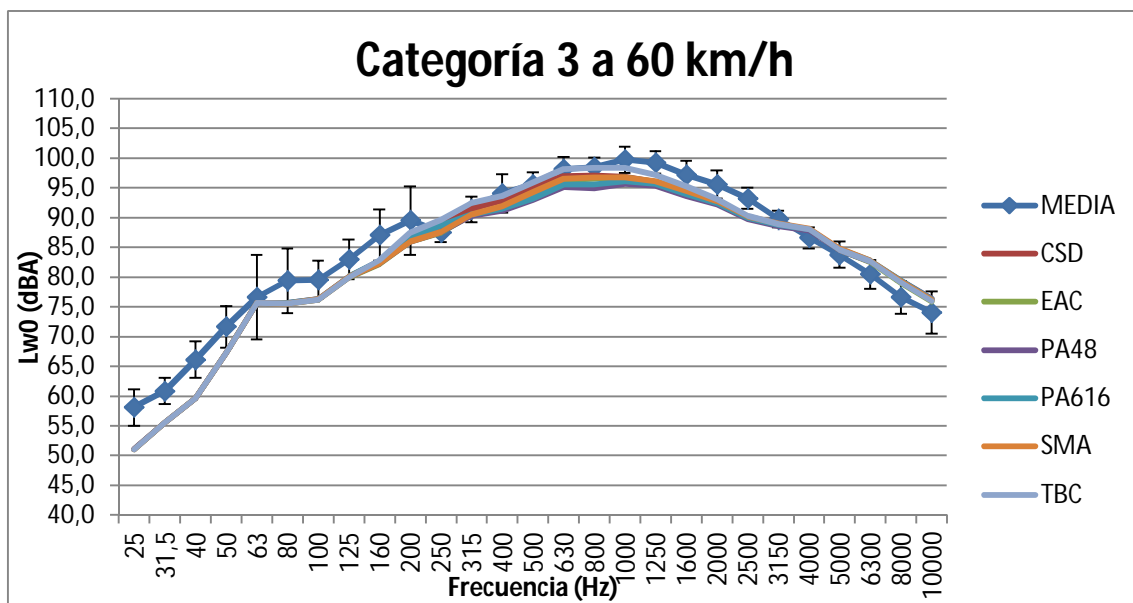


Fig. 6. 23.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 3 a 60km/h.

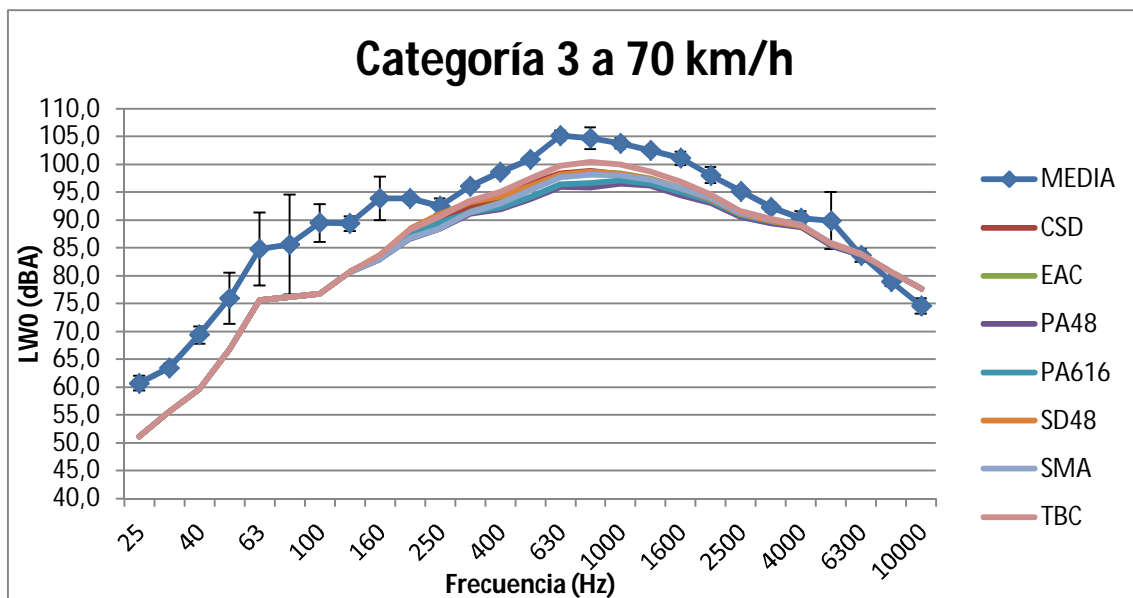


Fig. 6. 24.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 3 a 70km/h.

Anexo 6.4

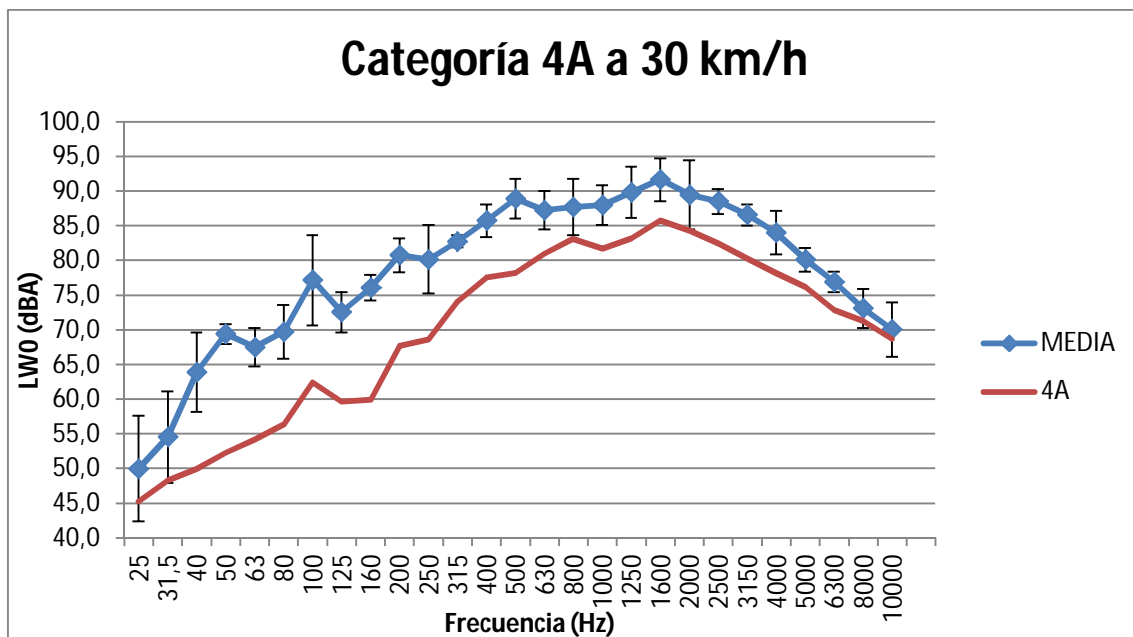


Fig. 6. 25.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 4A a 30km/h.

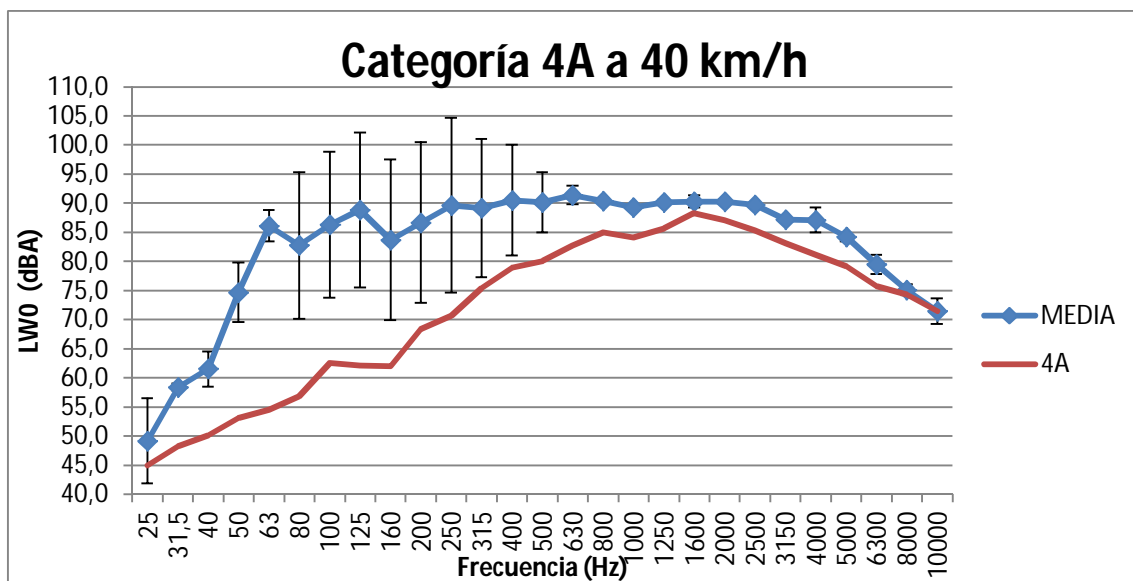


Fig. 6. 26.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 4A a 40km/h.

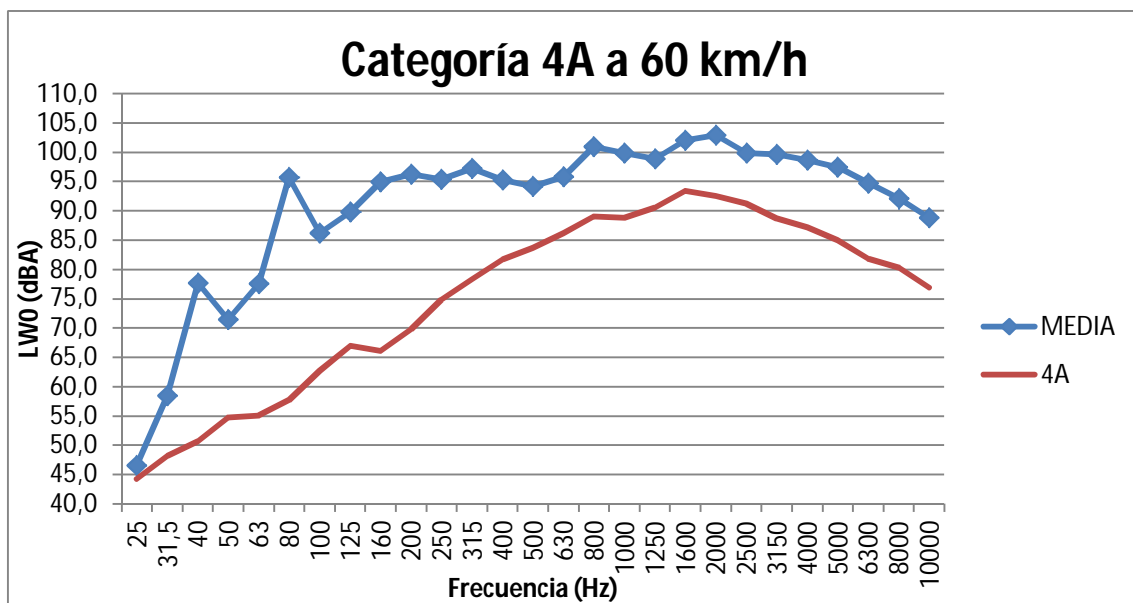


Fig. 6. 27.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 4A a 60km/h.

#### Anexo 6.5

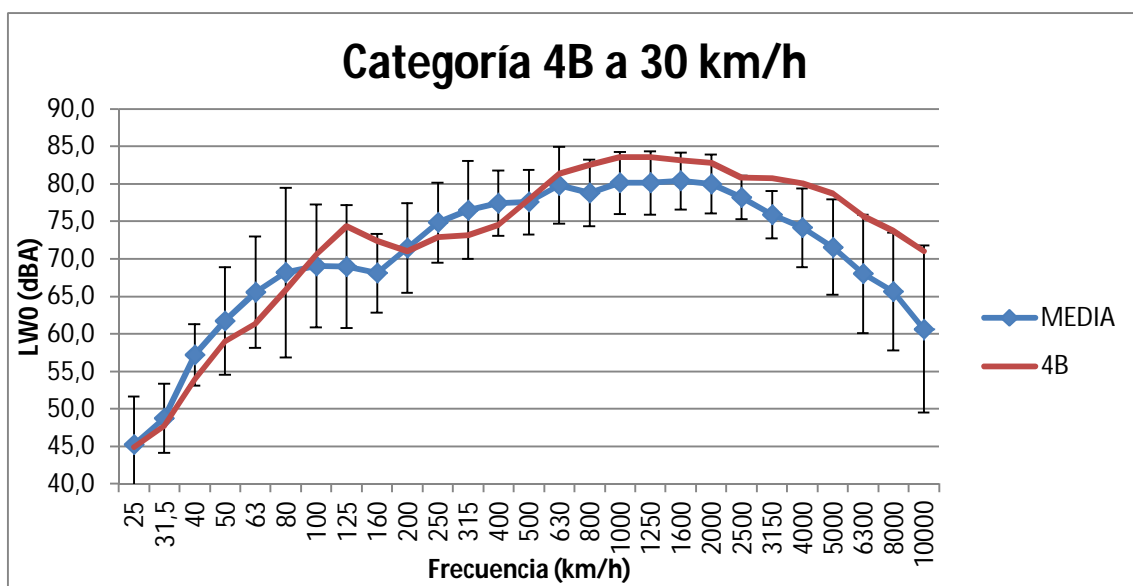


Fig. 6. 28.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 4B a 30km/h.

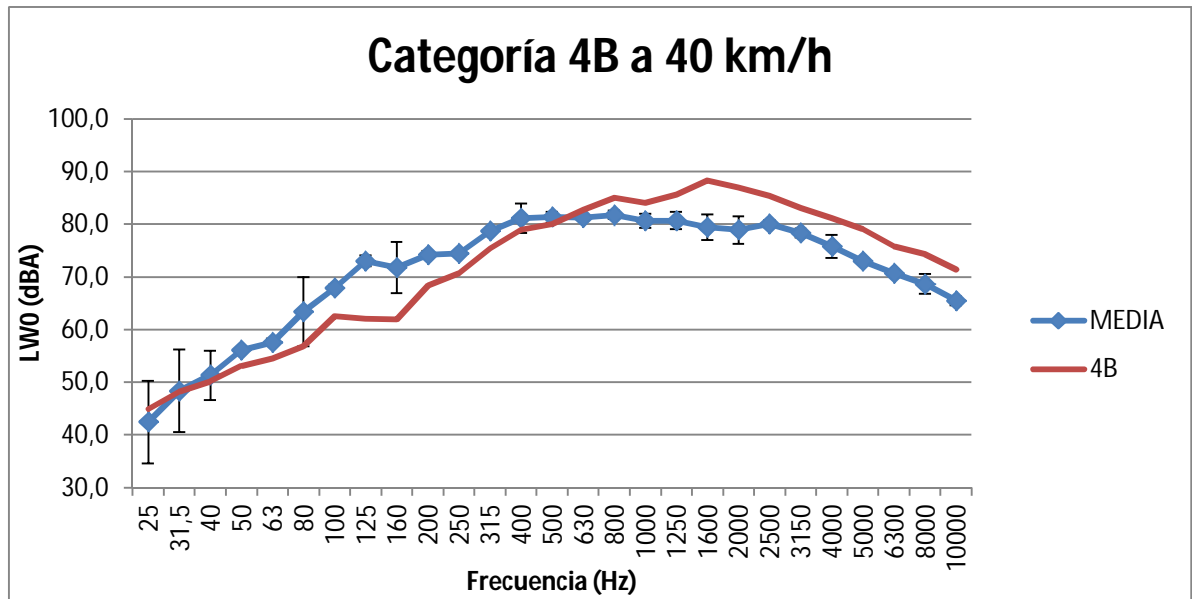


Fig. 6. 29.  $L_{w,0}$  medido y predicho según frecuencias para vehículos de categoría 4B a 40km/h.

# NUEVO MODELO DE PREDICCIÓN CNOSSOS-EU PARA EL TRÁFICO RODADO. AJUSTE CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Mikel Pascual Díez  
Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones,  
especialidad Imagen y Sonido

# PRESENTACIÓN

- Este proyecto está enmarcado dentro del campo de la acústica medioambiental.
- Se ha cuantificado el impacto ambiental producido por los vehículos al circular por una vía y se ha comparado con los niveles predichos por el estándar europeo CNOSSOS ("Common NOise aSSessment MethOdS").
- Se basa en unificar los diferentes métodos existentes en la Unión Europea sobre predicción de ruido tanto por el tráfico rodado como por tráfico aéreo y ferroviario.

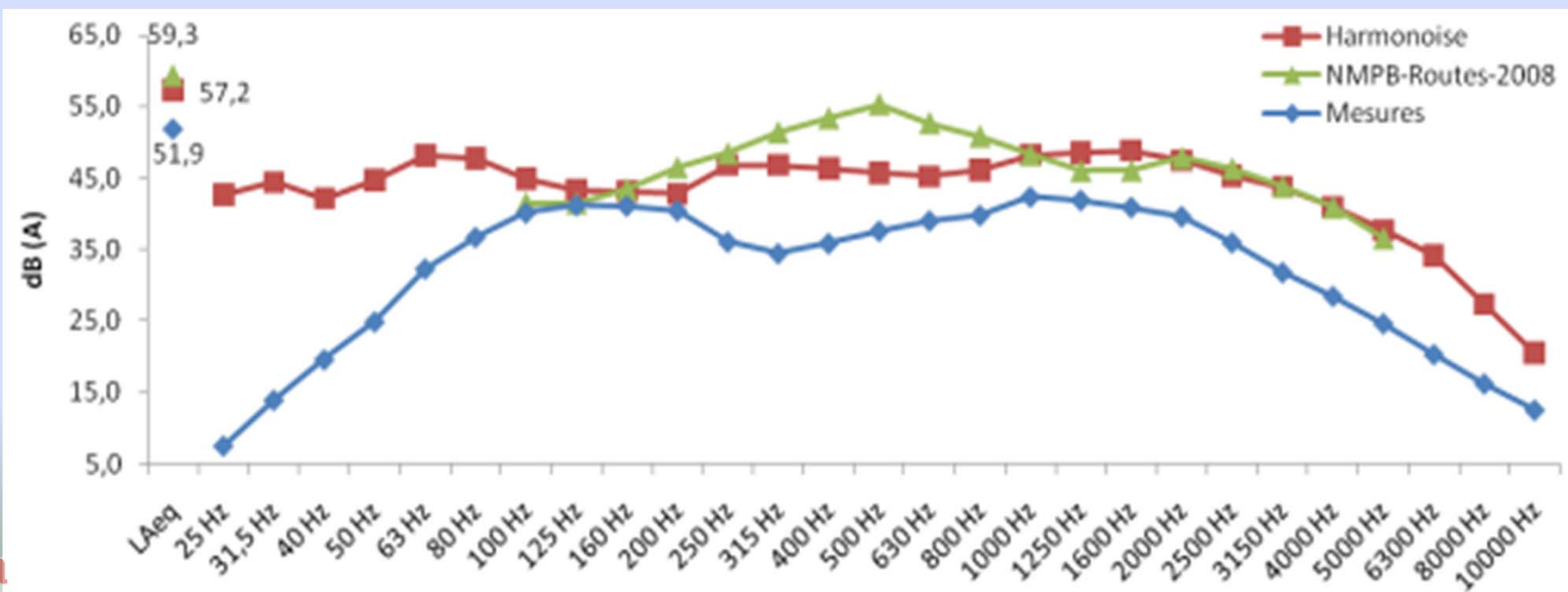


## OBJETIVO

- El objetivo principal de este Proyecto ha sido comprobar si concuerdan la predicción de ruido para tráfico rodado predicho por CNOSSOS y las medidas tomadas en las vías.
- Para ello se han llevado a cabo medidas de ruido ambiental con aforación de vehículos en los municipios de Barañain y Cizur Mayor.

# ANTECEDENTES DE CNOSSOS

- DIRECTIVA 2002/49/CE
  - Combatir el ruido que percibe la población sobre todo en zonas urbanizadas, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido.
  - Indicadores de ruido y métodos de evaluación, cartografiado estratégico, planes de acción e información.
- OTROS MODELOS
  - Nord 2000, Harmonoise, y NMPB-Routes-2008

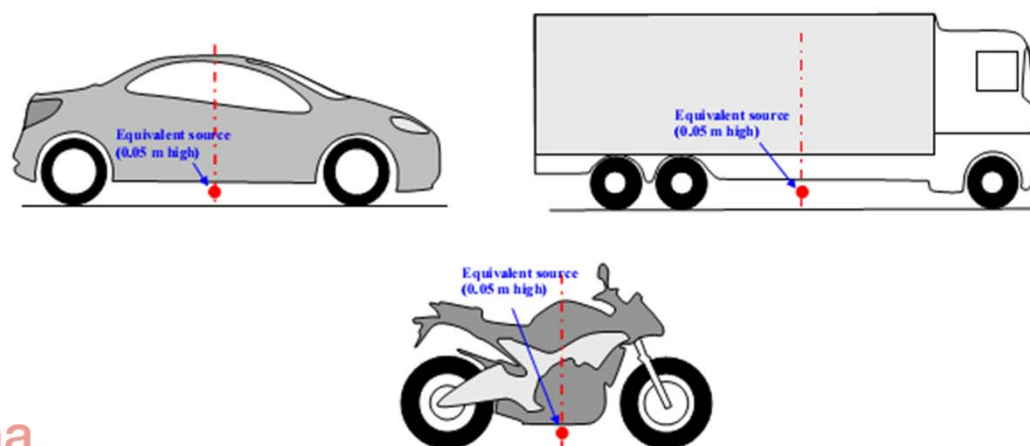


# CNOSSOS

- EMISIÓN DE RUIDO PARA TRÁFICO RODADO
  - Corresponde al nivel de ruido producido por el tráfico rodado.
  - Sus dos componentes principales son: Rolling Noise, y Propulsion Noise
- PROPAGACIÓN
  - Estudia la propagación del sonido producido por el tráfico rodado. (En este proyecto no se contrasta el modelo de propagación, solo el de fuente).

## TIPOS DE VEHÍCULO, DE ASFALTO Y POSICIÓN DE LAS FUENTES

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos ligeros	Coches de pasajeros, furgonetas de reparto inferiores a 3500 kg incluyendo trailers y caravanas.
2	Vehículos de peso medio	Furgonetas de reparto superiores a 3500 kg, autobuses, caravanas, etc. con dos ejes y doble montaje de neumático en el eje trasero.
3	Vehículos pesados	Camiones, autobuses, caravanas, con tres ejes como mínimo.
4 a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads inferiores a 50cc.
4 b		Motocicletas, triciclos o quads superiores a 50cc.



TBC: Transversely Brushed Concrete

CSD 2/4: Concrete with Surface Dressing 2/4

EAC: Exposed Aggregate Concrete

PA 6/16: Porous Asphalt 6/16

2PA 4/8-11/16: 2 layer

Porous Asphalt 4/8-11/16

SMA 0/6: Stone Mastic Asphalt 0/6

SD 4/8: Surface Dressing 4/8

# ROLLING Y PROPULSION NOISE

- Rolling Noise (ruido de rodadura)

$$L_{WR,j,m} = A_{R,j,m} + B_{R,j,m} \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,j,m}(v_m)$$

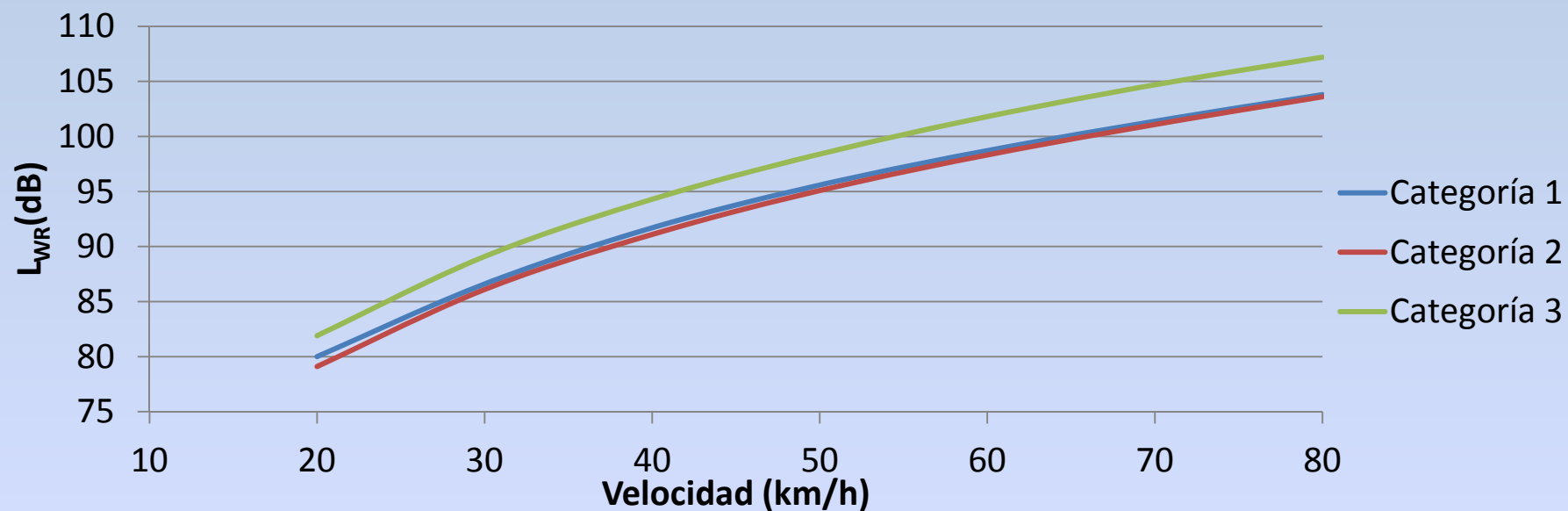
$$\Delta L_{WR,j,m}(v_m) = \Delta L_{WR,road,j,m}(v_m) + \Delta L_{studded\ tyres,j,m=1}(v_m) + \Delta L_{WR,acc,j,m} + \Delta L_{W,jemp}(\tau)$$

- Propulsion Noise (ruido de propulsion)

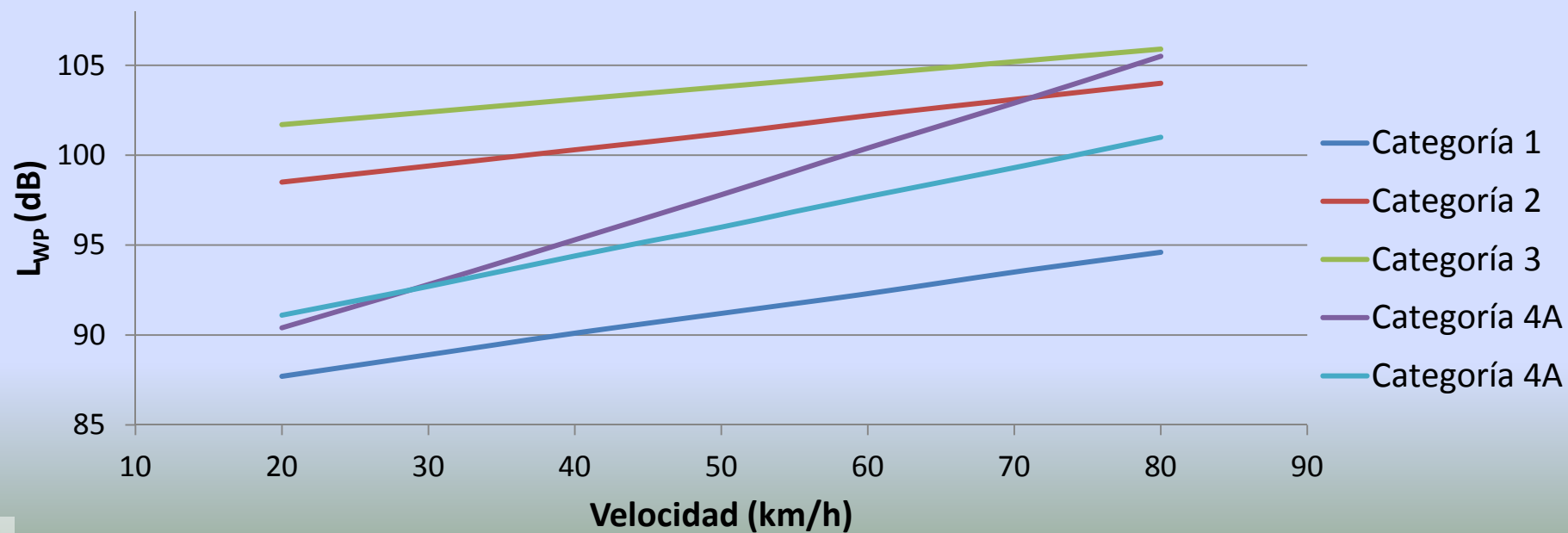
$$L_{WP,j,m} = A_{P,j,m} + B_{P,j,m} \times \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,j,m}(v_m)$$

$$\Delta L_{WP,j,m}(v_m) = \Delta L_{WP,road,j,m}(v_m) + \Delta L_{WP,acc,j,m} + \Delta L_{WP,grad,j,m}(v_m)$$

## Rolling Noise, según categoría y velocidad



## Propulsion Noise según velocidad y categoría



# CORRECCIÓN POR TIPO DE CALZADA

## ROLLING NOISE

$$\Delta L_{WR,road\ j,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right)$$

## PROPULSION NOISE

$$\Delta L_{WP,road\ j,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\}$$

- Para superficies densas no existe corrección del tipo de carretera en la emisión de propulsion noise. Para superficies porosas, la corrección es idéntica a la de rolling noise a velocidad de referencia, pero con un máximo de cero.

# CÁLCULO TEÓRICO

- Se calcula el nivel de potencia sonora, que genera un vehículo en tráfico rodado.
- Una vez obtenidos los valores de Rolling y Propulsion Noise, calculamos el **nivel de potencia instantánea de la fuente**.

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \times \lg \left( 10^{L_{WR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10} \right)$$

- Para vehículos de categoría 4 este apartado no será de aplicación, ya que la única fuente considerada es la superior (propulsión).



## POTENCIA MEDIA POR UNIDAD DE LONGITUD, $L_{W',eq,line}$

- Se expresa en dB/m (ref.  $10^{-12}$  w/m).
- Se tiene en cuenta el periodo de medida (T, en segundos), el número de vehículos en dicho periodo (N), y la velocidad media (V).

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

# NIVEL DE PRESIÓN SONORA EN EL RECEPTOR, $L_{Aeq}$

- Se tiene en cuenta la distancia de medida ( $h$ , en metros).

$$NPS = L_{W,eq,1ms} - 3 - 10 \cdot \log h$$

- El resultado se da en dBA.
- El nivel final quedará definido por las cinco variables anteriores (tipo de vehículo, tipo de calzada, velocidad, periodo de medida y  $n^o$  de vehículos) y también para  $h$  (distancia de medida).

# EJEMPLO

- Vehículo ligero distancia entre el centro del carril y el sonómetro **3,5 metros**, velocidad del vehículo **30 km/h** y el tiempo de medida **18 segundos**.

Frec(Hz)	A <sub>R</sub>	B <sub>R</sub>	Max{ $\alpha_{lm}; 0$ }	$\beta_m$	L <sub>WR</sub>	$\Delta L_{WR,road}$	L <sub>WR</sub>	Frec(Hz)	A <sub>p</sub>	B <sub>p</sub>	Max{ $\alpha_{lm}; 0$ }	L <sub>WP</sub>
25,0	69,9	33,0	0,0	6,0	57,756766	-2,207861	55,5	25,0	87,0	0,0	0,0	87,0
31,5	69,9	33,0	0,0	6,0	57,756766	-2,207861	55,5	31,5	87,0	0,0	0,0	87,0
40,0	69,9	33,0	0,0	6,0	57,756766	-2,207861	55,5	40,0	87,0	0,0	0,0	87,0
50,0	74,9	30,0	0,0	6,0	63,860696	-2,207861	61,7	50,0	87,9	0,0	0,0	87,9
63,0	74,9	30,0	0,0	6,0	63,860696	-2,207861	61,7	63,0	90,8	-3,0	0,0	92,5
80,0	74,9	30,0	0,0	6,0	63,860696	-2,207861	61,7	80,0	89,9	0,0	0,0	89,9
100,0	79,3	41,0	0,0	6,0	64,212952	-2,207861	62,0	100,0	86,9	8,0	0,0	82,3
125,0	82,0	41,2	0,0	6,0	66,839356	-2,207861	64,6	125,0	82,6	6,0	0,0	79,2
160,0	81,2	42,3	0,9	6,0	65,634582	-1,307861	64,3	160,0	81,9	6,0	0,9	79,4
200,0	80,9	41,8	1,7	6,0	65,51857	-0,507861	65,0	200,0	82,3	7,0	1,7	80,0
250,0	78,9	38,6	2,6	6,0	64,696096	0,3921393	65,1	250,0	83,9	8,0	2,6	81,9
315,0	78,8	35,5	2,5	6,0	65,736824	0,2921393	66,0	315,0	83,3	8,0	2,5	81,2
400,0	80,5	32,9	2,5	6,0	68,393564	0,2921393	68,7	400,0	82,4	8,0	2,5	80,3
500,0	85,0	25,0	2,4	6,0	75,80058	0,1921393	76,0	500,0	80,6	8,0	2,4	78,4
630,0	87,9	25,0	2,0	6,0	78,70058	-0,207861	78,5	630,0	80,2	8,0	2,0	77,6
800,0	90,9	27,0	1,6	6,0	80,964627	-0,607861	80,4	800,0	77,8	8,0	1,6	74,8
1000,0	93,3	33,4	1,2	6,0	81,009575	-1,007861	80,0	1000,0	78,0	8,0	1,2	74,6
1250,0	92,8	36,7	1,6	6,0	79,295252	-0,607861	78,7	1250,0	81,4	8,0	1,6	78,4
1600,0	91,5	37,0	2,0	6,0	77,884859	-0,207861	77,7	1600,0	82,3	8,0	2,0	79,7
2000,0	88,5	37,5	2,4	6,0	74,700871	0,1921393	74,9	2000,0	82,6	8,0	2,4	80,4
2500,0	84,9	37,5	1,6	6,0	71,100871	-0,607861	70,5	2500,0	81,5	8,0	1,6	78,5
3150,0	81,8	38,6	0,8	6,0	67,596096	-1,407861	66,2	3150,0	80,2	8,0	0,8	76,4
4000,0	78,7	39,6	0,0	6,0	64,128119	-2,207861	61,9	4000,0	78,5	8,0	0,0	73,9
5000,0	74,9	40,0	0,0	6,0	60,180929	-2,207861	58,0	5000,0	75,6	8,0	0,0	71,0
6300,0	71,8	39,9	0,0	6,0	57,117726	-2,207861	54,9	6300,0	73,3	8,0	0,0	68,7
8000,0	69,1	40,2	0,0	6,0	54,307333	-2,207861	52,1	8000,0	71,0	8,0	0,0	66,4
10000,0	65,6	40,3	0,0	6,0	50,770536	-2,207861	48,6	10000,0	68,1	8,0	0,0	63,5

# EJEMPLO

Frec(Hz)	LW,0	W,eq,lin	NPS	POND.A	ANPS
25,0	87,0	65,2	56,8	-44,7	12,1
31,5	87,0	65,2	56,8	-39,4	17,4
40,0	87,0	65,2	56,8	-34,6	22,2
50,0	87,9	66,2	57,7	-30,2	27,5
63,0	92,5	70,8	62,3	-26,2	36,1
80,0	89,9	68,1	59,7	-22,5	37,2
100,0	82,4	60,6	52,2	-19,1	33,1
125,0	79,4	57,7	49,2	-16,1	33,1
160,0	79,6	57,8	49,3	-13,4	35,9
200,0	80,2	58,4	50,0	-10,9	39,1
250,0	82,0	60,2	51,8	-8,6	43,2
315,0	81,3	59,6	51,1	-6,6	44,5
400,0	80,6	58,8	50,4	-4,8	45,6
500,0	80,3	58,6	50,1	-3,2	46,9
630,0	81,2	59,4	51,0	-1,9	49,1
800,0	81,9	60,1	51,7	-0,8	50,9
1000,0	81,9	60,1	51,7	0,0	51,7
1250,0	81,9	60,1	51,7	0,6	52,3
1600,0	81,9	60,2	51,7	1,0	52,7
2000,0	81,5	59,7	51,3	1,2	52,5
2500,0	79,3	57,5	49,0	1,3	50,3
3150,0	77,0	55,2	46,8	1,2	48,0
4000,0	74,4	52,6	44,2	1,0	45,2
5000,0	71,4	49,6	41,2	0,5	41,7
6300,0	69,0	47,3	38,8	-0,1	38,7
8000,0	66,7	44,9	36,5	-1,1	35,4
10000,0	63,8	42,0	33,6	-2,5	31,1
	98,417018	76,656105	68,2		61,1

Tipo de pavimento	
<b>TBC</b>	61,1 dBA
<b>CSD 2/4</b>	63,3 dBA
<b>EAC</b>	61,3 dBA
<b>PA 6/16</b>	61,5 dBA
<b>2PA 4/8 – 11/16</b>	59,1 dBA
<b>SMA 0/6</b>	60,2 dBA
<b>SD 4/8</b>	64,0 dBA



# CAMPAÑA DE MEDIDAS

- Se realizaron 44 medidas de 10 minutos de duración cada una.
  - 24 en Barañain, 15 en Cizur Mayor y 6 en Campanas.



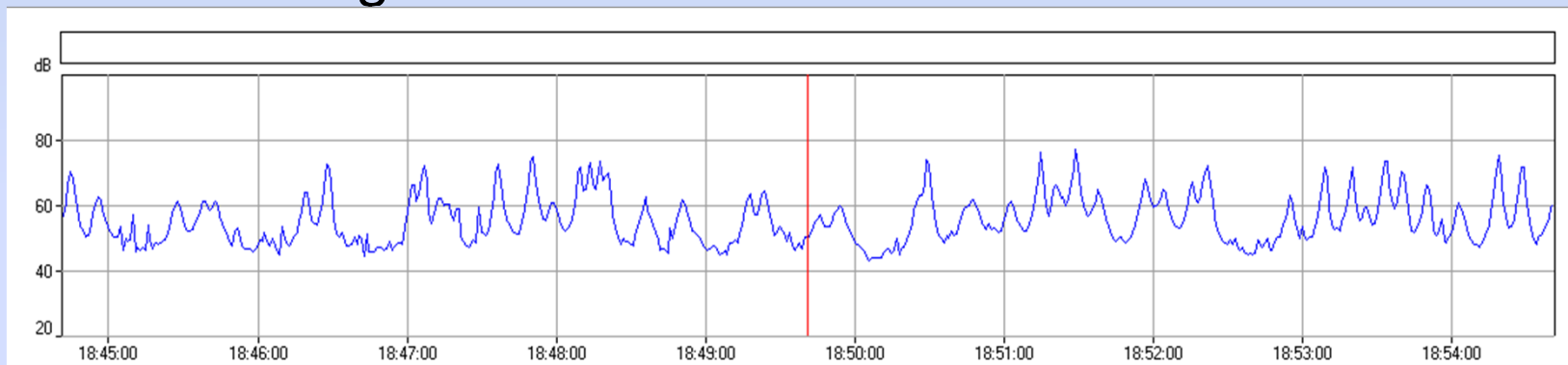
# PREPARACIÓN

- Elegir un punto concreto donde colocar el sonómetro separado de la vía lo suficiente para no suponer un obstáculo a los vehículos y apartado de cualquier obstáculo alrededor para que no se produzca el efecto del apantallamiento.
- Colocar el sonómetro con ayuda del trípode a 1,5 metros sobre el suelo.

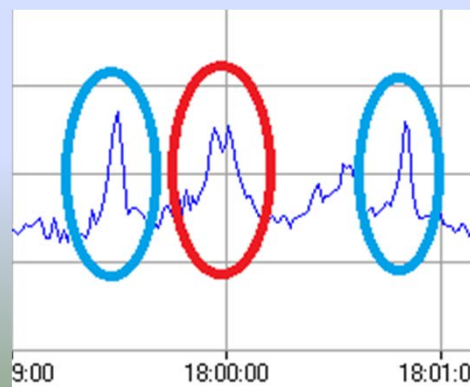


# AFORACIÓN

- En cada medida se registra para cada paso de un vehículo el tipo de vehículo, velocidad (km/h), minuto de paso y carril.
- Al descargar las medidas en el ordenador, observamos la curva registrada.



- Y se trata de aislar los pasos correctamente.





# CÁLCULO $L_{Aeq}$

Start time	$L_{Aeq}$		$L_{Leq}$ 25Hz	$L_{Leq}$ 31,5Hz	$L_{Leq}$ 40Hz	$L_{Leq}$ 50Hz	$L_{Leq}$ 63Hz
11:33:38	49,2		57,15	58,14	59,34	63,19	52,5
11:33:39	50,1		52,73	60,19	61,2	62,06	50,36
11:33:40	54,25		57,4	56,36	55,9	64,81	49,82
11:33:41	59,5		55,4	55,74	51,19	57,94	55,18
11:33:42	60,55		57,89	60,95	55,46	56,54	52,87
11:33:43	62,27		59,65	57,81	61,09	61,21	50,97
11:33:44	65,41		56,49	55,43	57,07	66,53	51,17
11:33:45	71,01		51,8	57,99	58,8	74,49	56,62
11:33:46	74		64,74	63,72	68,35	78,54	65
11:33:47	64,79		56,91	59,18	62,93	69,13	54,18
11:33:48	60,3		57,44	60,59	57,82	66,25	52,02
11:33:49	58,52		54,74	56,1	53,38	62,62	57,41
11:33:50	55,52		57,77	58,15	56,5	61,37	57,03
11:33:51	54,2		52,2	63,49	60,43	59,46	54,91
11:33:52	52,98		54,59	63,15	58,2	62,86	57,66
11:33:53	51,68		57,26	61,3	58,08	61,34	57,05
11:33:54	50,51		55,5	60,52	60	63,37	54,75
11:33:55	54,16		56,79	60,85	63,96	57,84	50,6

...



# CÁLCULO $L_{Aeq}$

Start time	Energía		Energía 25Hz	Energía 31,5Hz	Energía 40Hz
11:33:38	83176,3771		518800,0389	651628,3941	859013,5215
11:33:39	102329,299		187499,4508	1044720,219	1318256,739
11:33:40	266072,506		549540,8739	432513,831	389045,145
11:33:41	891250,938		346736,8505	374973,0022	131522,4832
11:33:42	1135010,82		615176,8727	1244514,612	351560,4405
11:33:43	1686553,03		922571,4272	603948,6294	1285286,66
11:33:44	3475361,61		445656,2484	349140,3155	509330,8711
11:33:45	12618275,3		151356,1248	629506,1829	758577,575
11:33:46	25118864,3		2978516,429	2355049,284	6839116,473
11:33:47	3013006,02		490907,8762	827942,1637	1963360,277
11:33:48	1071519,31		554625,713	1145512,941	605340,8748
11:33:49	711213,514		297851,6429	407380,2778	217770,9772
11:33:50	356451,133		598411,5951	653130,5526	446683,5922
11:33:51	263026,799		165958,6907	2233572,223	1104078,62
11:33:52	198609,492		287739,8415	2065380,156	660693,448
11:33:53	147231,25		532108,2593	1348962,883	642687,7173
11:33:54	112460,497		354813,3892	1127197,456	1000000
11:33:55	260615,355		477529,2737	1216186,001	2488857,318
<b>ΣEnergía</b>	51511027,6		10475800,6	18711259,12	21571182,73

$$\sum_1^n 10^{\frac{L_{A,eq}(n)}{10}}$$

$$L_{A,eq,T} = 10 \times \log \left( \frac{N}{M} \times \text{Energía} \right)$$

Leq	64,5662771		57,64914718	60,16830508	60,78601453
		POND. A	-44,7	-39,4	-34,6
<b>L<sub>Aeq</sub></b>	<b>64,6</b>		<b>12,9</b>	<b>20,8</b>	<b>26,2</b>

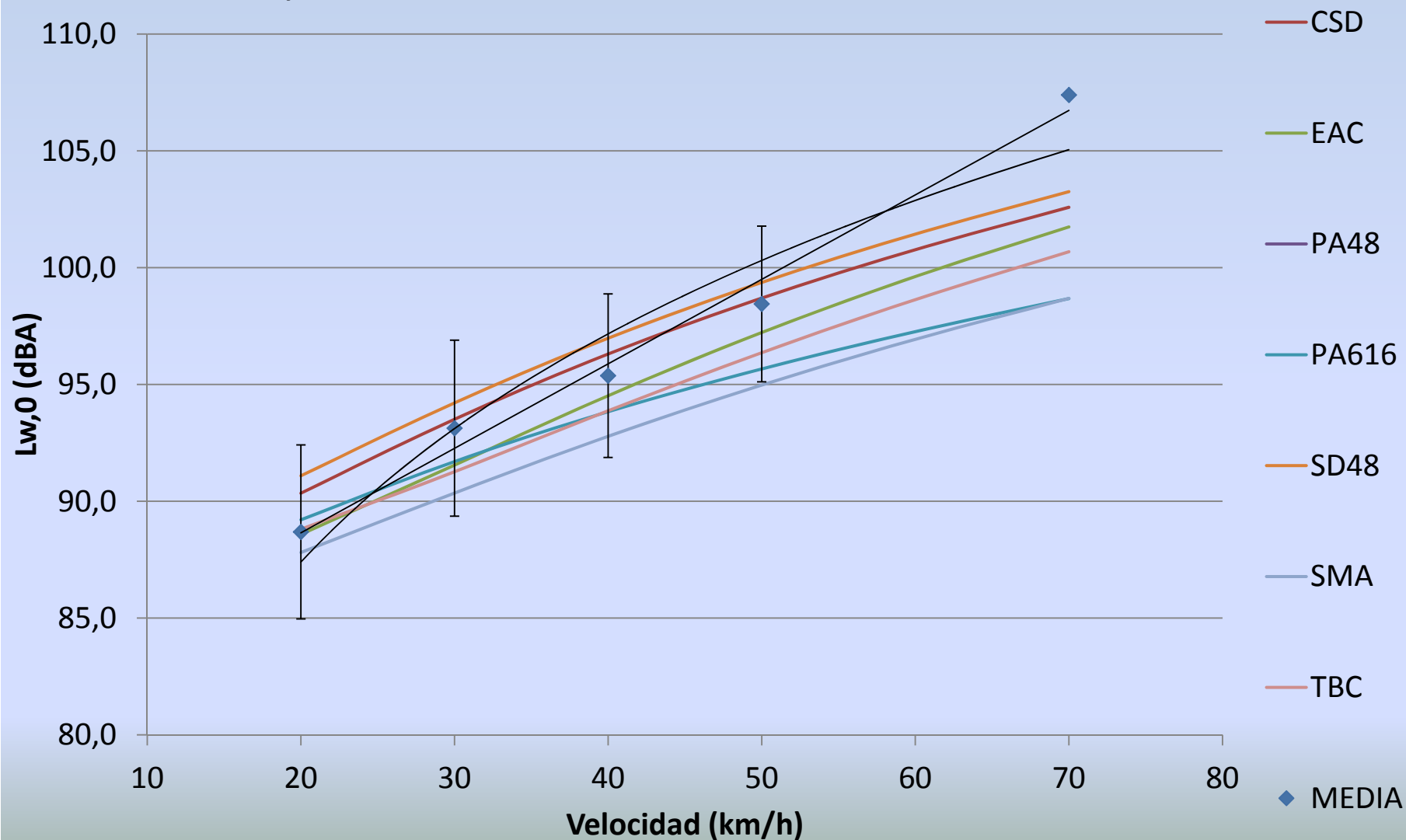
# CÁLCULO $L_{W,0}$

- Comparar los datos medidos de los predichos con el índice  $L_{Aeq}$  resulta complicado . Por eso se utiliza el índice  $L_{W,0}$
- $T=18$  s,  $N=1$ ,  $h= 3,5$  m y  $v= 8,3$  m/s

Freq. (Hz)	L <sub>Aeq</sub> (dBA)	L <sub>W,0</sub> (dBA)
25,0	12,9	43,1
31,5	20,8	51,0
40,0	26,2	56,4
50,0	38,6	68,8
63,0	30,3	60,5
80,0	30,7	60,9
100,0	37,7	67,9
125,0	34,5	64,7
160,0	39,1	69,3
200,0	43,6	73,8
250,0	45,5	75,7
315,0	48,3	78,5
400,0	46,9	77,1
500,0	52,2	82,4
630,0	52,9	83,1
800,0	56,7	86,9
1000,0	57,1	87,3
1250,0	56,4	86,6
1600,0	56,3	86,5
2000,0	54,5	84,7
2500,0	50,1	80,3
3150,0	46,4	76,6
4000,0	43,3	73,5
5000,0	38,2	68,4
6300,0	33,6	63,8
8000,0	29,1	59,3
10000,0	23,9	54,1
	64,6	94,8

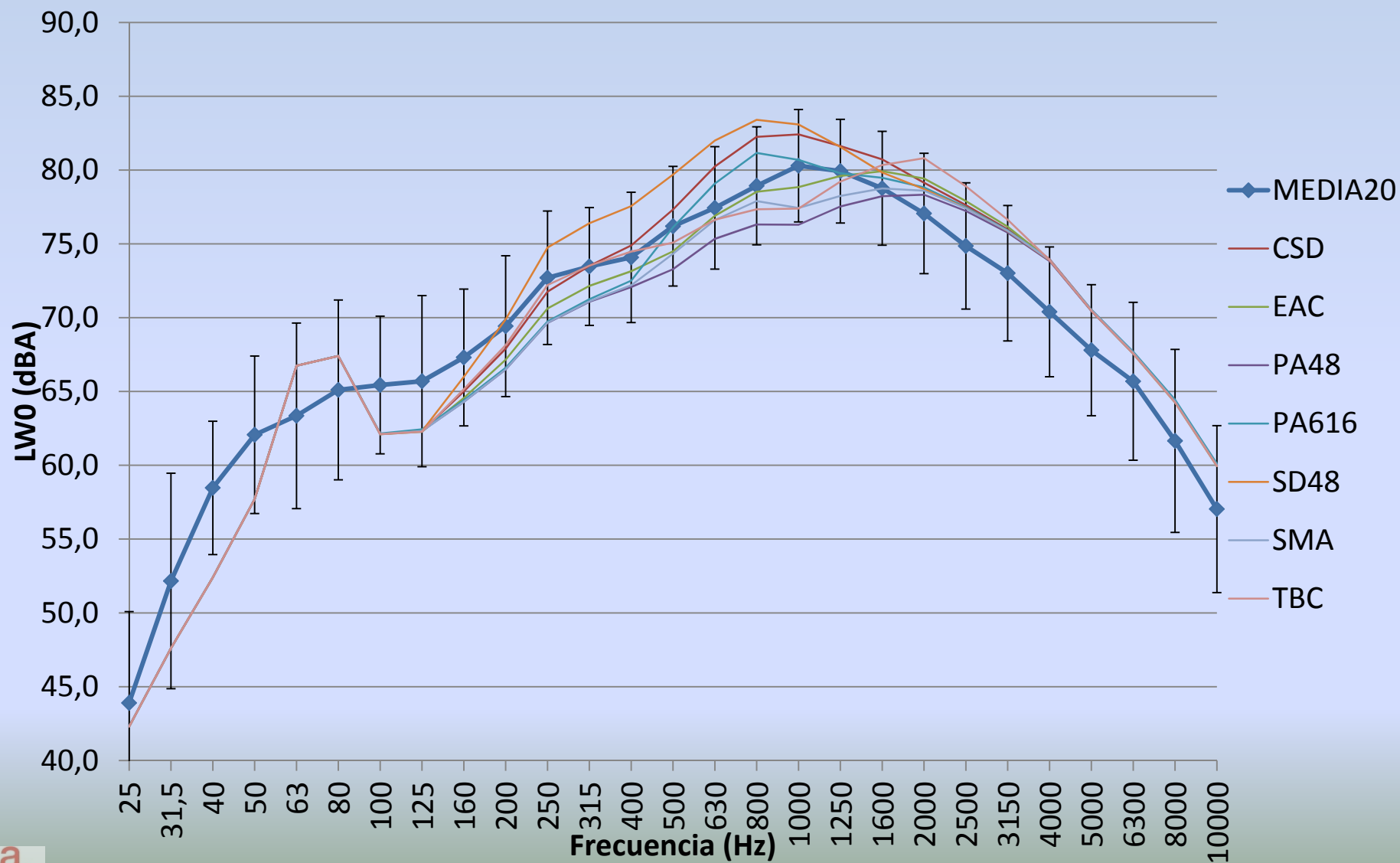
$$L_{W,0} = L_{Aeq} + 3 + 10 \log(h) - 10 \log\left(\frac{N}{T \cdot V}\right)$$

## $L_{w,0}$ según velocidad para categoría 1

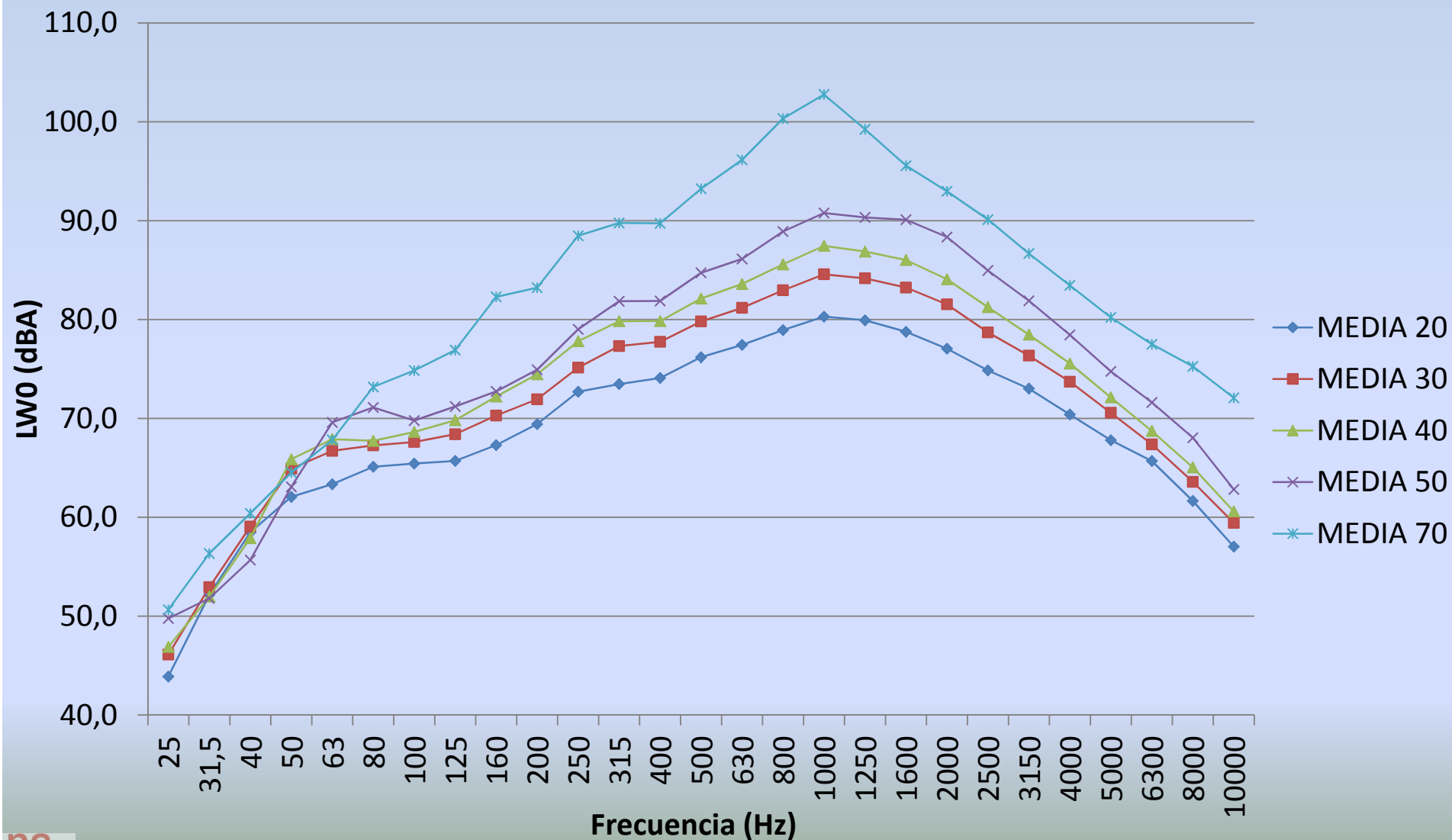


# RESULTADOS

## Categoría 1 a 20 km/h

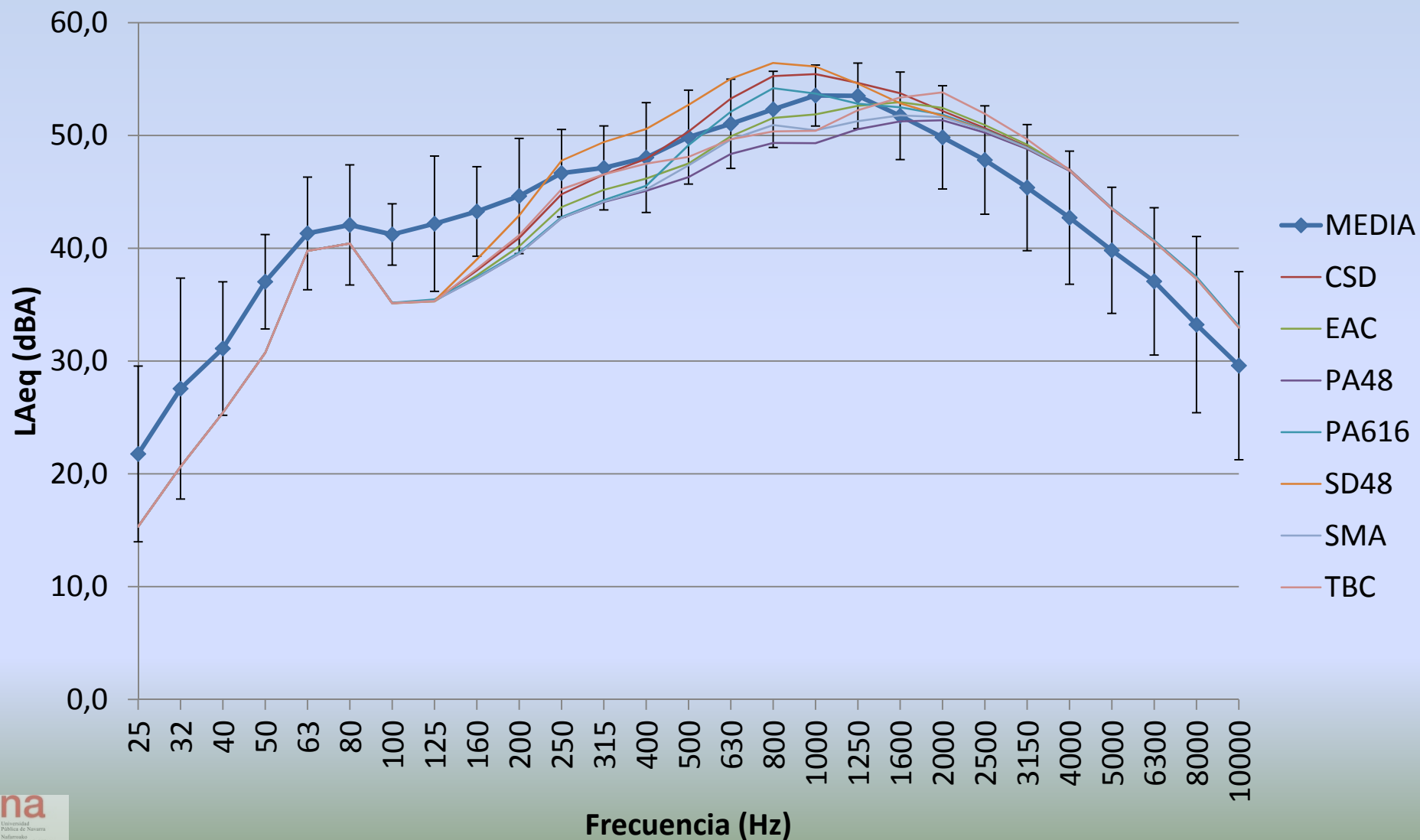


## Comparativa velocidades de categoría 1



# RESULTADOS

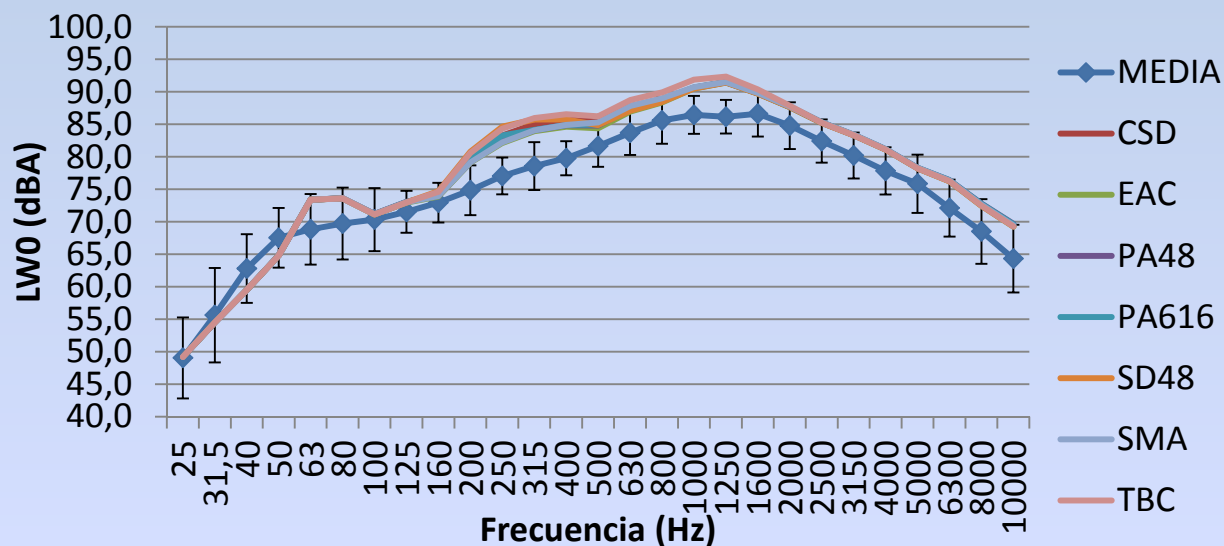
**$L_{Aeq}$  a 20 km/h**



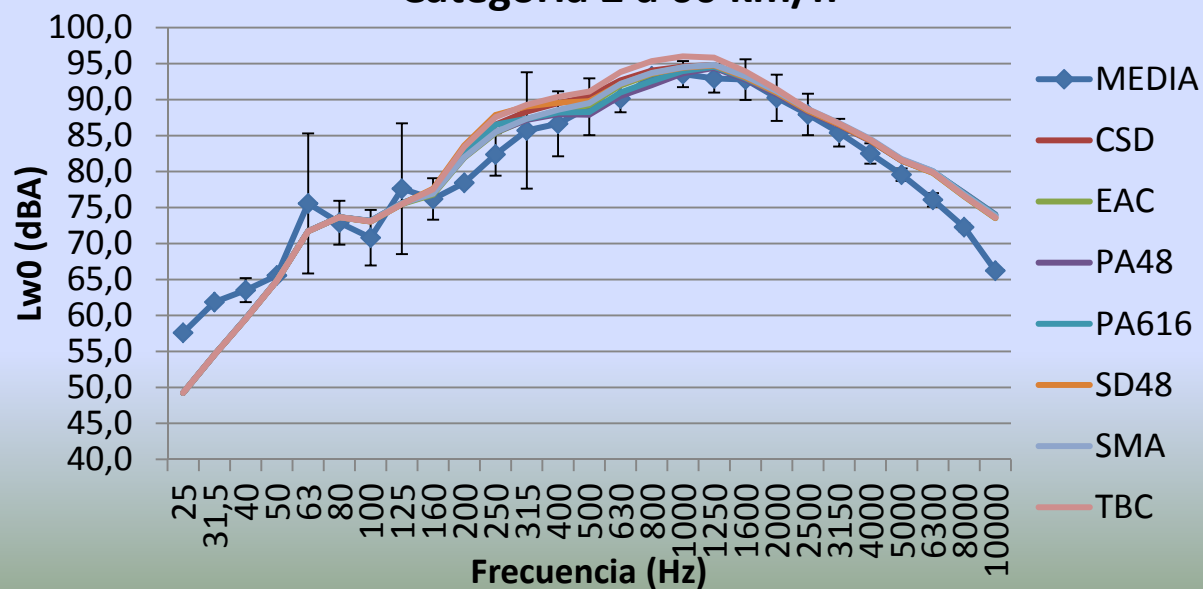
# RESULTADOS

PFC Mikel Pascual Díez

**Categoría 2 a 30 km/h**

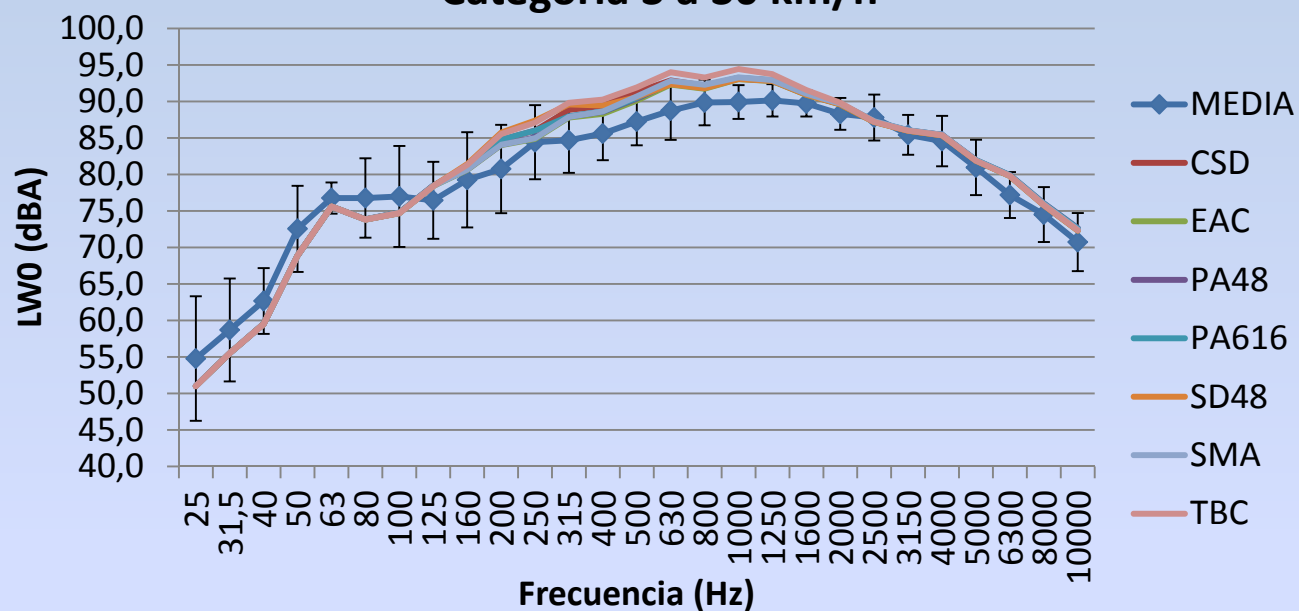


**Categoría 2 a 60 km/h**

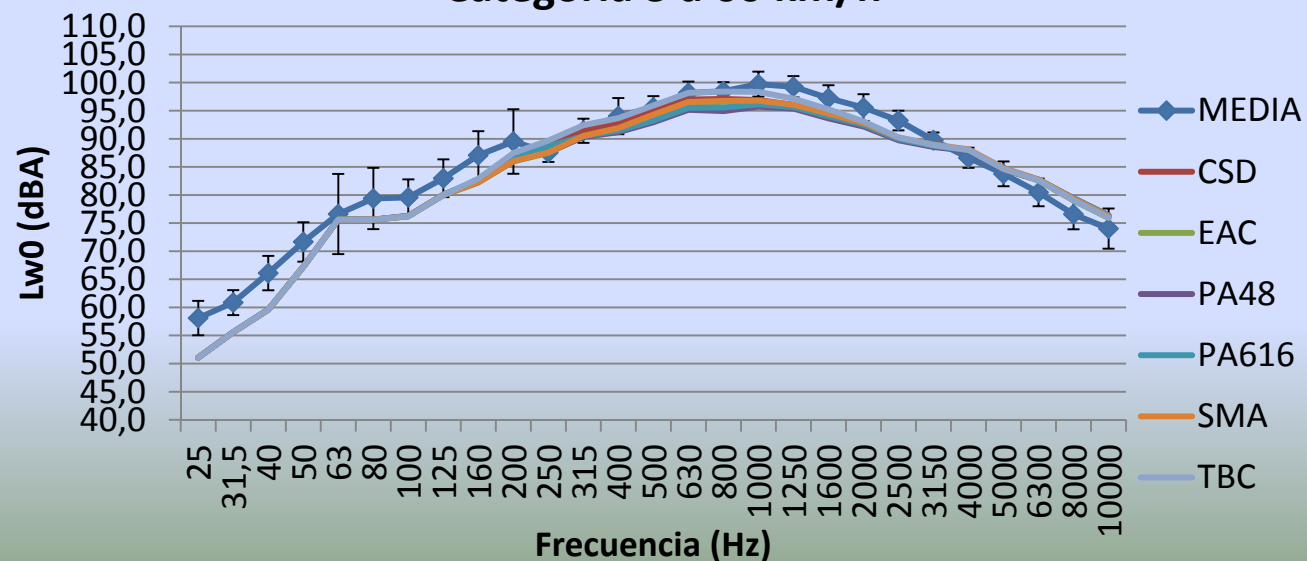




## Categoría 3 a 30 km/h



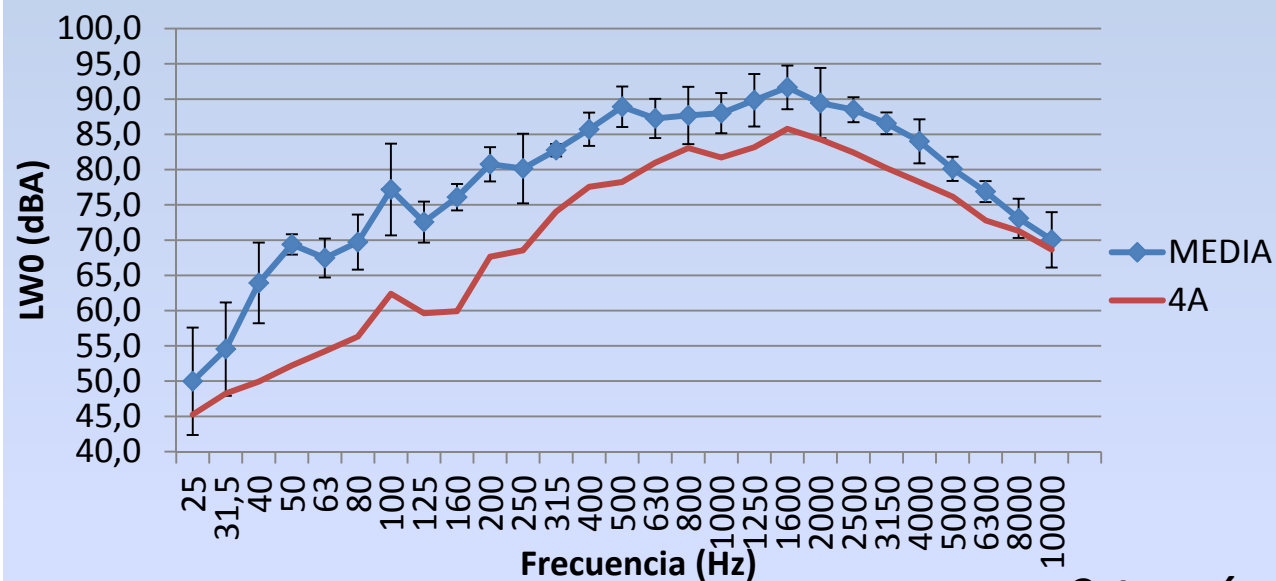
## Categoría 3 a 60 km/h



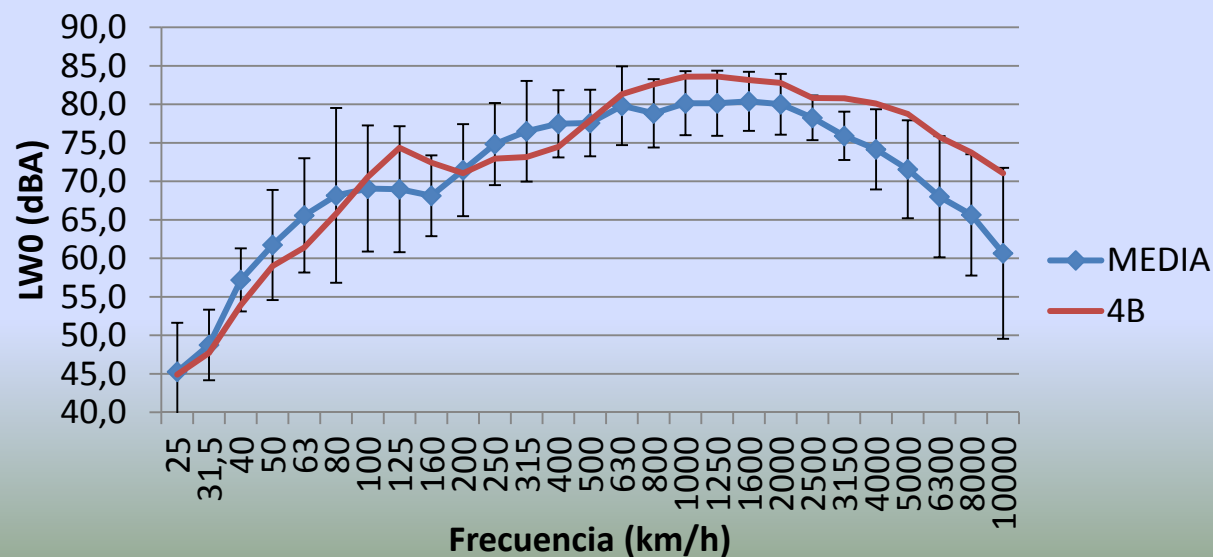


# RESULTADOS

## Categoría 4A a 30 km/h



## Categoría 4B a 30 km/h



- Objetivo principal: evaluar la concordancia existente entre el modelo de predicción de ruido CNOSSOS de 2012 y las medidas tomadas en tramas urbanas.
- Los vehículos ligeros han representado el 75% del total de vehículos.
- La concordancia que existe entre los valores predichos por CNOSSOS y los valores medidos, sobre todo en la categoría 1, nos permite concluir como válidas las predicciones del modelo.
  - Hemos comparado 3 tipos de datos, la potencia instantánea en la fuente en banda ancha ( $L_{W,0}$ ), la potencia instantánea en tercios de octava, y el nivel de ruido equivalente en tercios de octava  $L_{Aeq}$ .
  - Y en el caso de los vehículos ligeros ha producido unos resultados muy buenos en los que las diferencias en ningún caso han superado los 6 dBA entre los valores predichos y los medidos.

# CONCLUSIONES

- Entre las frecuencias de 250 Hz y 1250 Hz es donde mayor concordancia se observa.
- En frecuencias más bajas y más altas donde mayor diferencia se genera.
- No existe ningún asfalto en concreto de los presentados que muestre una diferencia cualitativa respecto a los demás.
  - El peor, SD 4/8.
- A medida que crece el número de pasos registrados, el error se reduce.
- Mayor incertidumbre, por desconocimiento del pavimento y velocidad real.

# Gracias por su atención

Mikel Pascual Díez  
Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones,  
especialidad Imagen y Sonido

# REFERENCIAS

- Comparativa de nuevos modelos europeos de predicción de niveles de ruido de tráfico rodado. [http://www.labcat.cat/attachments/File/AAM\\_002.pdf](http://www.labcat.cat/attachments/File/AAM_002.pdf)
- Evaluación y gestión del ruido, Unión Europea.  
[http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/noise\\_pollution/l21180\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/noise_pollution/l21180_es.htm)
- Versión CNOSSOS 2012.  
[http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/26390/1/cnossos-eu%20jrc%20reference%20report\\_final\\_on%20line%20version\\_10%20august%202012.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/26390/1/cnossos-eu%20jrc%20reference%20report_final_on%20line%20version_10%20august%202012.pdf)
- Draft JRC Reference Report on Common NOise ASsessment MethOdS in EU (CNOSSOS-EU) to be used by the EU Member States for strategic noise mapping after adoption as specified in the Directive 2002/49/EC Version 2d, 28 May 2010
- Directiva 2002/49/CE. <http://sicaweb.cedex.es/docs/leyes/Directiva-2002-49-CE-Evaluacion-gestion-ruido-ambiental.pdf>